



Betonların Aşındırma ve Karbonatlaşma Performanslarına Kireçsi Uçucu Küllerin Farklı İncelik ve İkame Oranlarının Etkisi

Demet Demir Şahin^{1*}, Mustafa Çullu², Hasan Eker³

¹ Gümüşhane Meslek Yüksek Okulu, Madencilik ve Maden Çıkarma Bölümü, Gümüşhane, Türkiye (ORCID: 0000-0003-0338-6562)

² Gümüşhane Üniversitesi, Gümüşhane Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Gümüşhane, Türkiye (ORCID: 0000-0002-0454-7949)

³ Gümüşhane Üniversitesi, Gümüşhane Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Gümüşhane, Türkiye (ORCID: 0000-0003-2644-4681)

(İlk Geliş Tarihi 1 Aralık 2019 ve Kabul Tarihi 31 Aralık 2019)

(DOI: 10.31590/ejosat.654733)

ATIF/REFERENCE: Şahin, D. D., Çullu, M. & Eker, H. (2019). Betonların Aşındırma ve Karbonatlaşma Performanslarına Kireçsi Uçucu Küllerin Farklı İncelik ve İkame Oranlarının Etkisi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (17), 1150-1163.

Öz

Bu çalışmada Afşin Elbistan/ Kahramanmaraş termik santral atığı C tipi uçucu kül (UK) kullanılmıştır. Bu kül öğütülmüş ve 6 farklı incelik değeri elde edilmiştir. Uçucu küle ait değişik incelik değerleri ile betonda çimento yerine % 10, % 30 ve % 50 ikame oranlarında kullanılarak katkı ve uçucu kül katkısız referans beton örnekleri hazırlanmıştır. Sertleşmiş beton örnekleri üzerine uçucu kül incelik değerinin etkisini belirlemek için aşınma ve karbonatlaşma direnci deneyleri yapılmıştır. Aşınma direnci ASTM C 944-99 standardında ifade edilen Rotating Cutter yöntemine göre 28, 56 ve 90 günlük kür süresini tamamlamış beton örnekleri üzerine uygulanmıştır. Karbonatlaşma direnci için örnekler 360 gün karbondioksit miktarı yoğun bir ortama bırakılmış ve karbonatlaşma derinliği belirlenmiştir. Elde edilen deney sonuçlarına göre; % 10 ve % 50 uçucu kül ikameli beton numunelerinde öğütme süresinin yarmada çekme dayanımı üzerinde pek fazla etkili olmamış, ama referans numuneye göre uçucu kül ikamesinin dayanımı artırdığı anlaşılmıştır. Ayrıca % 30 uçucu kül ikameli beton numunelerinde öğütme süresinin yarmada çekme dayanımını çok az artırdığı görülmektedir, ancak bu karışım oranında referans numunenin elde ettiği dayanım değerinin altında değer almıştır. Beton karışımlarına ikame edilen uçucu kül oranlarının artmasıyla birlikte karbonatlaşma derinliği artmıştır. En yüksek karbonatlaşma derinliği değeri 0, 20, 30 ve 45 dakika öğütme sürelerine sahip % 50 UK ikameli beton örneğinde (1,0 cm), en düşük karbonatlaşma derinliği değeri (0.3 cm) ise 10 ve 45 dakika öğütme süresine sahip % 10 UK ikameli beton örneklerinde elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre; beton karışımlarında kullanılan UK'ün öğütme süresinin karbonatlaşma derinliği üzerinde pek fazla değişikliğe neden olmadığı görülmüştür. % 10, 30 ve 50 UK ikameli beton karışımları içerisinde en fazla aşınma miktarı 28 günlük kür süresinde meydana gelmiştir. % 10 UK ikameli beton karışımında öğütme süresi arttıkça 28 günlük kür süresi numunelerinin aşınma miktarlarında genel olarak arttığı söylenebilir, ama 56 ve 90 günlük kür sürelerinde pek etkisi olduğu söylenemez. Diğer UK ikame oranlarında (% 30 ve 50) öğütme süresinin artmasıyla 28, 56 ve 90 günlük kür süresine sahip numunelerinin aşınma miktarlarında belirgin bir değişiklik gözlemlenmemiştir.

Anahtar Kelimeler: Uçucu kül, C tipi, Beton, Aşınma direnci, Karbonatlaşma derinliği, Yarmada çekme dayanımı.

The Effect of Different Fineness and Substitution Ratios of Limy Fly Ashes on Abrasion and Carbonation Performance of Concrete

Abstract

Afşin Elbistan / Kahramanmaraş thermal power plant waste C type fly ash (UK) was used in this study. This ash was ground and 6 different fineness values were obtained. With different fineness values of fly ash, reference concrete samples with and without fly ash

* Sorumlu Yazar: Gümüşhane Üniversitesi, Meslek Yüksek Okulu, Madencilik ve Maden Çıkarma Bölümü, Gümüşhane, Türkiye, ORCID: 0000-0003-0338-6562, demetdemir2929@hotmail.com

admixture were prepared by using 10%, 30% and 50% substitution rates instead of cement in concrete. Abrasion and carbonation resistance tests were performed to determine the effect of fly ash fineness on hardened concrete samples. Abrasion resistance was applied on concrete samples which have completed curing time of 28, 56 and 90 days according to Rotating Cutter method stated in ASTM C 944-99 standard. For carbonation resistance, the samples were left in a dense medium for 360 days and the carbonation depth was determined. According to the experimental results obtained; In 10% and 50% fly ash substitute concrete samples, grinding time did not have much effect on bending strength, but it was found that fly ash substitution increased the strength according to the reference sample. Furthermore, it is seen that the grinding time increases slightly the tensile splitting strength in 30% fly ash substitute concrete samples, but this mixture ratio is below the resistance value obtained by the reference sample. The depth of carbonation increased with the increase of fly ash content added to concrete mixtures. The highest carbonation depth value is in the 50% UK substituted concrete sample (1.0 cm) with 0, 20, 30 and 45 minutes grinding time, the lowest carbonation depth value (0.3 cm) is 10% UK substituted with 10 and 45 minutes grinding time concrete samples. According to the results obtained; It was found that the grinding time of UK used in concrete mixtures did not cause much changes on the carbonation depth. The maximum wear rate in the 10, 30 and 50% UK substituted concrete mixtures occurred during the curing period of 28 days. It can be said that the 28-day curing time increases the wear amount of the samples as the grinding time increases in the 10% UK-substituted concrete mixture, but it is not very effective in curing times of 56 and 90 days. In other UK substitution rates (30 and 50%), it cannot be said that the abrasion amounts of the samples with a curing time of 28, 56 and 90 days are increased as the grinding time increases.

Keywords: Fly ash, Type C, Concrete, Abrasion resistance, Carbonation depth, Flexural strength

1. Giriş

Beton içerisinde kullanılan çimento üretim aşamaları boyunca maliyeti ve enerji tüketimi yüksek bir bileşendir. Üretimi boyunca büyük çevresel sorunların oluşmasına neden olmaktadır. Betonun temel bileşenleri çakıl, kum, su ve portland çimentosudur. Çimento ağırlıkça sadece % 10 - 15 oranında beton içermesine rağmen, betonun çevresel etkilerinin çoğundan sorumludur. Çimento üretimi sonucu yüksek oranda CO₂ gazı açığa çıkmaktadır. Dünya çapında oluşan toplam karbondioksitin (CO₂) % 6 - 7'si Portland çimentosu üretimi sırasında oluşmaktadır (Siddique vd., 2007). Ancak katkılı çimento kullanılarak CO₂ gazı yayılımını yaklaşık olarak % 13 - 22 oranında azaltabilmektedir (Rashad, 2015). Ayrıca Dünya nüfusunun artması ve buna paralel olarak konut ihtiyacının doğması beton ve çimentoya olan ihtiyacı gün geçtikçe artırmaktadır. Bu yüzden çimento yerine beton bileşiminde kullanılabilen ucuz, kolay temin edilebilen, betonun özelliklerini teknik bakımdan destekleyen, düşük enerji tüketimine sahip ve çevreci bir beton üretimine katkı sağlayacak alternatif kaynak arayışlarına yönelinmektedir (Archarya ve Patro, 2016).

Uçucu kül betonda çimento yerine yaygın olarak kullanılan termik santral bacalarından doğaya yayılan atık bir üründür (Siddique ve Khatib, 2010). Ekonominin ve dünyanın büyümesi sonucu fosil yakıtla üretilen enerji miktarının artmasıyla birlikte çevresel anlamda atık olan uçucu kül miktarlarında artmaktadır (Rashad, 2015). Beton içerisinde uçucu kül kullanılması termik santrallerden kaynaklı çevresel problemlerin ve elektrik maliyetinin azalmasını yanı sıra katı atık miktarında azaltmaktadır. Böylece çimento üretiminden kaynaklı sera gazı miktarı düşmekte ve doğal hammadde kaynaklarının önemli miktarının korunması sağlanmaktadır (Mehta, 1993; Erdoğan, 1997). Ekonomik olarak betonda çimento yerine uçucu külün kullanılması betonun dayanım ve durabilite özelliklerini geliştirmektedir. Çimentoya kıyasla uçucu kül içeren beton daha az su gereksinimine sahip olmakta ve soğuk havalarda kolaylıkla kullanılabilir. Ayrıca betonun priz başlama ve bitiş sürelerini geliştirmeye, basınç dayanımını arttırmaya (uzun dönem daha etkili), işlenebilirliği geliştirmeye, geçirimsizliği ve terlemeyi azaltmaya, hidrasyon ısısını düşürerek çatlak oluşumunu engellemeye, su/çimento oranını azaltmaya büyük oranda katkı sağlamaktadır (Siddique, 2004).

Karbonatlaşma beton bileşimine zarar veren kimyasal bir olaydır. Karbonatlaşmanın beton üzerinde zararlı etkisi betonun pH değerinin düşmesi ile betonarme demirlerinin korozyonu üzerinde olumsuz etki oluşturmaktadır. Betonda karbonatlaşma olayı beton bileşimine (agrega, su, çimento, mineral katkılar ve kimyasal katkılar), boşluk suyu, nem, geçirgenlik, betonun yalıtım özelliğine, beton sınıfına, zaman ve paspayı kalınlığı gibi faktörlere bağlıdır (Ramyar, 2007). Betondaki karbonatlaşma olayı çimento hamuru sertleştikten sonra CO₂ ile reaksiyona girmesi ve uzun bir süre reaksiyonun devam etmesi sonucu karbonatlaşma olayı gerçekleşmekte ve bunun sonucunda betonda büzülme meydana gelmektedir. Büzülme olayı özellikle bağıl nem oranı % 50 seviyelerinde olması durumunda gerçekleşmektedir. Bu orandan daha yüksek bağıl nem miktarında betonun gözeneklerinin su ile dolması ve CO₂ gazının hamurun içerisine girmesi engellenerek karbonatlaşma olayı gerçekleşmemektedir. Karbonatlaşma olayı ilk olarak betonun yüzeyinde başlamakta olup ağ çatlaklar şeklinde ilerleyerek betonun dayanımının düşmesine neden olur. CO₂ bakımından zengin bir ortama maruz kalmış betonlarda çatlak derinlikleri yüzeysel olmayıp daha derinlere doğru ilerlemesi ile beton içerisinde bulunan donatı çeliğinin zarar görmesine de neden olmaktadır (Akman, 1992). Betona zarar veren karbonatlaşma olayını daha az seviyelerde tutabilmek için yapılması gereken en önemli işlev geçirimsiz betonlar üretmekle mümkün olabilmektedir. Geçirimsiz beton üretmek filler (dolgu) etkisine sahip malzeme kullanımı ile sağlanmaktadır. Bunun için betonda geçirimsizlik büyük oranda mineral katkılarının kullanımı ile gerçekleştirilmektedir. Mineral katkı olarak betonda kullanılan yüksek fırın cürufu, uçucu kül, silis dumanı gibi malzemeler çimentoya kıyasla daha çok geçirimsizlik sağlamakta, Ca(OH)₂'i bağlanmakta ve ortamın pH değerini düşürerek karbonatlaşma derecesini düşürmektedir. Ayrıca bu gibi malzemeler ince taneli olması ve çimento miktarını azaltması sonucu boşlukları daha iyi doldurarak

geçirimsizliği arttırmaktadır (Papadakis vd., 1991; Ruixia, 2010; Limbachiya vd., 2012; Erdoğan, 2003). Ortamda bulunan reaktif nem oranı % 50 civarında olması karbonatlaşmayı artırırken % 25'den az ve % 100 olması durumunda karbonatlaşma gözlemlenmemektedir. Bir betonda karbonatlaşmanın oluştuğunu belirlemek için taze beton yüzeyinden koparılan parçanın yüzeyine phenolphthalein uygulandığında renk değişimi pembe olduğu durumda karbonatlaşma gerçekleşmediği renksiz durumda karbonatlaşmanın olduğunu göstermektedir. Betonun yüzeyinde mikro çatlakların sayısının ve geçirimsizlik özelliğinin artması karbonatlaşma derinliğinde arttıracaktır. Mineral katkıları özellikle beton geçirimsizliği üzerine etkili olup betonda kullanılan mineral katkıların kimyasal özelliğine ve tane boyutuna göre geçirimsizlik özelliğini etkilemektedir (Topçu, 2006, Subaşı vd., 2011). Ayrıca sıcaklığın artması ile karbonatlaşma olayı da artmaktadır. Çünkü sıcaklık artışına bağlı olarak CO₂ molekülleri betonun boşluk çözeltisinde yayıldığı için malzemelerin göç etmesine ve kimyasal olarak karbonatlaşma olayının oluşmasına neden olur. Karbonatlaşma olayı oluşumunda betonun içerisindeki boşluk yapısının yüksek olması beton içerisine CO₂ gazı girişinin kolay ve fazla olmasını sağlamaktadır. Bu gazın pasta içerisinde olması ile pastada bulunan Ca(OH)₂'i CaCO₃ dönüştürerek pH değerini düşürür ve karbonatlaşmanın oluşmasına neden olur (Da Silva ve De Oliveira Andrade, 2017; Ruixiq, 2010).

Beton bileşiminde uçucu kül kullanımı, çimento ile puzolanların reaksiyona girmesi sonucu silisyum hidroksit oluşması ile çimento bileşenlerini bağlayarak çimento miktarını azaltır ve beton dayanımının artmasına katkı sağlamaktadır. Uçucu küller bazen betonda karbonatlaşma oluşumuna katkı sağlayarak korozyon gelişimine sebep verebilmektedir. Bu yüzden kalsiyum hidroksit (CH ya da Ca(OH)₂) ve kalsiyum silika hidrat (CSH) oluşum sürecinin iyi anlaşılması gerekmektedir. Karbonatlaşma olayı, CH, CS yapılarından gelen Ca⁺² ve C S H ve hidrate olmuş kalsiyum alimünat yapıları farklı kalsiyum karbonat yapılarının oluşmasına yol açar (Borges vd., 2010). Reaksiyon sonucu oluşan kalsit hacmi CH yapısının hacminden daha büyük olması ve CH yapısının ilk olarak nüfus etmesi poroziteyi düşürmeye ve en içteki karbonat yapısının oluşmasına neden olmaktadır (Borges vd., 2010; Morandau vd., 2014; Reis vd., 2014). Karbonatlaşma görülen örneklerde ağırlık daha fazla olurken, porozite daha düşük ve erken yaşlarda dayanım daha düşük değerler almaktadır (Borges vd., 2010). Bu yüzden düşük poroziteli pastalarda kalsit poroziteyi düşürerek, CO₂'in içeri girmesini engelleyerek ve karbonatlaşma saldırılarını azaltmaktadır.

Orhaneli Termik Santralinden alınan uçucu külün çimento yerine % 0, % 5, % 10, % 20 ve % 30 oranlarında kullanarak elde ettikleri beton örnekleri üzerinde karbonatlaşma derinliği değerleri incelenmiştir. Buna göre; uçucu kül ikame oranının artmasıyla karbonatlaşma derinliğinin de arttığı sonucuna varılmıştır. Kullanılan uçucu kül çimentoya göre daha ince taneli olmasına bağlı olarak oluşan yerleştirme problemleri sonucu fazla boşluk oluşmasına neden olmuştur. Buna bağlı olarak oluşan boşluk sonucu betonun geçirimsizliği ve karbonatlaşma derinliği artmıştır (Topçu, 2006, Subaşı vd., 2011).

Beton, sertleştikten sonra bileşiminde bulunan bileşenler ve çevresel faktörler tarafından etkilenmeyip dayanım ve diğer özelliklerini koruması durabilite (dayanıklılık, kalıcılık) olarak tanımlanmaktadır. Durabilitesi yüksek olan betonun hizmet süresi de oldukça yüksektir. Sertleşmiş betonun ilk dayanımı yüksek olmasına rağmen dış çevrenin etkisi ile fiziksel ve kimyasal yönden zarar görebilmektedir. Beton; olarak donma - çözünme, aşınma ve ıslanma - kuruma gibi fiziksel etkilerden etkilenmektedir. Betonda dış etkilerden dolayı oluşan çevresel problemler ile mücadele etmede en etkili yöntem geçirimsizlik özelliğinin artırılmasıdır. Geçirimsiz beton kolaylıkla ıslanmayacak ve kimyasal zararlardan etkilenmeyeceği için fiziksel dayanım yönünden aşınma direncini de düşürecektir. Bu yüzden dayanıklı bir beton (iç ve dış etkilere maruz kaldığında değişime uğramadan), mekanik kuvvet haricinde fiziksel ve kimyasal etkilere karşı bozulmadan direnç sağlayabilmektedir (Şahin, 2004). Betonda aşınma olayı, kaldırım ve beton yollarda insan ve trafik kaynaklı oluşmaktadır ve su yapılarında ise akarsuların taşıdığı malzemelere maruz kalması sonucu oluşmaktadır. Aşınma olayı uzun bir süreçte gerçekleşmekte ve yavaş gelişen fiziksel ve mekanik bir olaydır. Betonda oluşabilecek aşınma olayı, betonun kür süresine, mineral katkı kullanımına, basınç dayanımına, su/çimento miktarına, agrega - bağlayıcı hamur kalitesine ve ara yüzey özelliğine bağlıdır. Beton bileşiminde kullanılan mineral katkıları beton içerisinde çimentonun su ile karışması sonucu oluşan hidratasyon ürünü olan Ca(OH)₂ reaksiyona girerek bağlayıcılık kazanmasına ve daha geçirimsiz, yüksek işlenebilirlik özelliğine sahip, uzun dönemdeki basınç dayanımını ve aşınma direncini arttırmaktadır (Bilim, 2011).

Sertleşmiş pastada aşınma direnci oldukça düşüktür. Ayrıca dayanıklı agrega kullanımı ve düşük su/çimento oranının tercih edilmesi uçucu kül katkılı betonlarda aşınma direnci üzerinde oldukça etkilidir. Uçucu külün beton içerisinde kullanılması çimento pastasını geliştirmekte ve zamanla oluşan kalsiyum hidroksitten dolayı da geçirimsizliği azaltmaktadır. Uçucu külün betonda daha iyi bir bağlayıcı özelliğe sahip olması ve çimento pastasının daha yoğun bir yapı haline getirmesi bağlayıcı matriksinin dışında bulunan iri agregaların aşınma direncini azaltmasına neden olmaktadır (Li, 1989). Ayrıca kür süresinin artmasıyla birlikte uçucu kül içeren betonların, içermeyen betonlara göre aşınma kayıpları daha fazla olmaktadır. Buna ek olarak betonun C sınıfı uçucu kül içermesinin, F sınıfı uçucu kül katkılı betonlara göre daha yüksek aşınma dayanım direnci göstermesini sağlamaktadır (Tikal'sky vd., 1988). Langan vd. (1990) çalışmalarında çimento yerine yüksek oranda uçucu kül (% 50) ikame edilmesinin aşınmaya bağlı ağırlık kayıplarının artmasına neden olduğunu ve ağırlık kaybı miktarının uçucu kül içermeyen katkısız betonlara göre daha yüksek değerler aldığını ortaya koymuşlardır. Naik vd., (1995) çalışmalarında ise % 30 ve üzerinde uçucu kül kullanımının beton örneklerinin aşınma dayanım direnci üzerinde

kontrol betonuna göre düşük olduğu ve çok az bir fark olduğunu belirlemişlerdir. Naik vd., (1998) diğer çalışmalarında ise; F ve C tipi uçucu kül karışımlarının bir arada kullanıldığı beton numunelerinin; kontrol beton numuneleri ve sadece C tipi uçucu kül karışımı numunelere göre hem daha iyi sıkışma sağladığı hem de daha yüksek aşınma dayanım direnci sağladıklarını ifade etmişlerdir. Siddique (2003) çalışmasında ise; F sınıfı uçucu külün % 10, % 20, % 30 ve % 40 oranında ince agrega yerine ikame edilmesiyle 28, 91 ve 365 gün sonrasında aşınma direnci değerlerinin uçucu kül içeriğinin artmasıyla birlikte basınç dayanımını ve aşınma direncini arttırdığını ortaya koymuşlardır.

Literatürde F ve C tipi uçucu küllerin çimento yerine farklı oranlarda ikamesiyle hazırlanan beton örnekleri üzerinde aşınma dayanımı değerleri elde edilmişken bu tip küllerin farklı öğütme sürelerindeki aşınma dayanımının belirlenmediği görülmektedir. Ayrıca karbonatlaşma derinliği de sadece farklı ikame oranlarındaki uçucu küller için belirlenmiştir. Farklı öğütme sürelerinin karbonatlaşma derinliği üzerindeki etkisi konusunda herhangi bir çalışma bulunmamaktadır. Bu nedenle çalışmamızda C tipi uçucu kül bilyalı değirmende 0, 10, 20, 30, 45 ve 60 dk sürelerinde öğütülmüş ve beton içerisinde çimento yerine % 10, % 30 ve % 50 gibi yüksek oranlarda ikame edilmiştir. Elde edilen farklı incelik ve ikame oranlı uçucu kül katkılı betonlar ile referans betonun karbonatlaşma ve aşınma dirençleri belirlenmiştir. Elde edilen deney sonuçlarına göre; % 10 ve % 50 uçucu kül ikameli beton numunelerinde öğütme süresinin yarmada çekme dayanımı üzerinde pek fazla etkili olmadığı, ama referans numuneye göre uçucu kül ikamesinin dayanımı artırdığı anlaşılmıştır. Ayrıca % 30 uçucu kül ikameli beton numunelerinde öğütme süresinin yarmada çekme dayanımını çok az artırdığı görülmektedir, ancak bu karışım oranında referans numunenin elde ettiği dayanım değerinin altında değer almıştır. Beton karışımlarına ikame edilen uçucu kül oranlarının artmasıyla birlikte karbonatlaşma derinliği artmıştır. En yüksek karbonatlaşma derinliği değeri 0, 20, 30 ve 45 dakika öğütme sürelerine sahip % 50 UK ikameli beton örneğinde (1,0 cm), en düşük karbonatlaşma derinliği değeri (0.3 cm) ise 10 ve 45 dakika öğütme süresine sahip % 10 UK ikameli beton örneklerinde elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre; beton karışımlarında kullanılan UK'ün öğütme süresinin karbonatlaşma derinliği üzerinde pek fazla değişikliğe neden olmadığı görülmüştür. % 10, 30 ve 50 UK ikameli beton karışımları içerisinde en fazla aşınma miktarı 28 günlük kür süresinde meydana gelmiştir. % 10 UK ikameli beton karışımında öğütme süresi arttıkça 28 günlük kür süresi numunelerinin aşınma miktarlarında genel olarak arttırdığı söylenebilir, ama 56 ve 90 günlük kür sürelerinde pek etkisi olduğu söylenemez. Diğer UK ikame oranlarında (% 30 ve 50) öğütme süresinin artmasıyla 28, 56 ve 90 günlük kür süresine sahip numunelerinin aşınma miktarlarında belirgin bir değişiklik gözlemlenmemiştir (Burayı çıkarım Girişi kısmında sonuç vermesek daha iyi olmaz mı).

2. Materyal ve Metot

2.1. Materyal

Çalışmada materyal olarak kireçtaşı agregası, çimento, uçucu kül ve Gümüşhane Belediye'si şehir şebeke suyu kullanılarak beton örnekleri üretilmiştir.

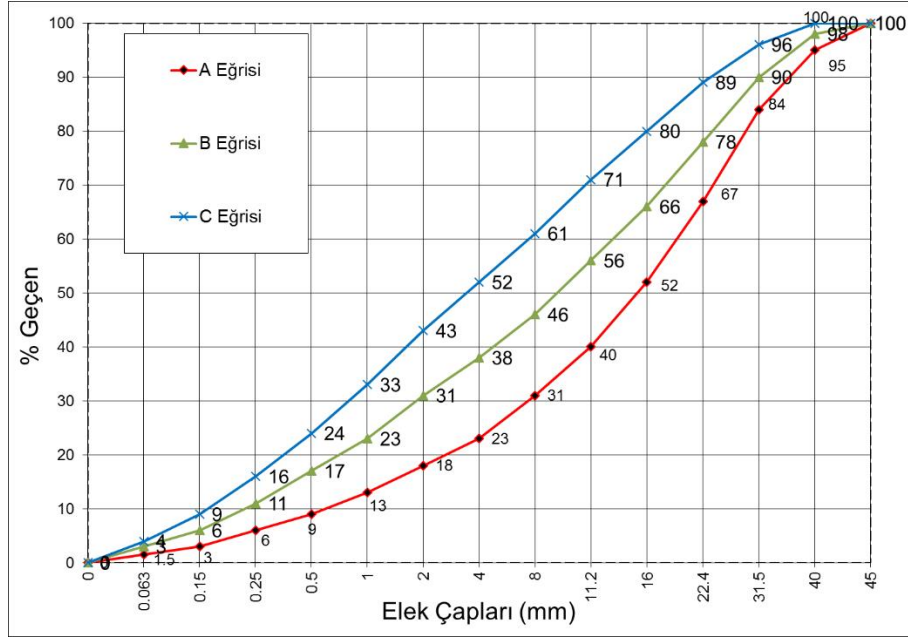
2.1.1. Agrega

Beton bileşiminde kullanılan agregalar 0 - 4 mm, 4 - 11.2 mm, 11.2 - 22.4 mm boyutlarında gruplandırılmıştır. Bu agregalar Gümüşhane yöresine ait kireç taşlarından oluşmaktadır (Şekil 1).



Şekil 1. Beton bileşiminde kullanılan farklı boyutlu agregalar.

Çalışma içerisinde kullanılan kireçtaşı agregalarına ait granülometri eğrileri Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. TS 802 standardına göre agregalara ait gronülometrik eğrileri

2.1.2. Çimento

Beton karışımlarında CEM I 42.5 R Portland çimentosu kullanılmış ve Gümüşhane Aşkale çimento fabrikasından temin edilmiştir. Çimentonun kendine özgü fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. CEM I 42.5 R tipi çimentonun özellikleri.

Kimyasal Analizler		Fiziksel Testler	
SiO ₂	18,59	İncelik (45 µ elek üstü %)	8,58
Al ₂ O ₃	4,69	Özgül Ağırlık (gr/cm ³)	3,08
Fe ₂ O ₃	3,04	Özgül Yüzey (cm ² /gr)	4145
CaO	60,34	Priz Başlangıcı (saat-dk)	2s-33 dk
MgO	1,92	Priz Sonu(saat-dk)	3s-18 dk
SO ₃	2,89	Hacim Genişlemesi(mm)	0,7
Kızdırma Kaybı	7,19	Su İhtiyacı %	29,9
Na ₂ O	0,11	Basınç Dayanımı(N/mm ²)	
K ₂ O	0,64		
Cl	0,0189	2.Gün	23,9
Ölçülemeyen	0,57	28.Gün	51,1
Toplam	100		
s.CaO	0,38		
Katkı%	17,87		

Kullanılan çimentonun özgül ağırlığı 3,08 g/cm³, özgül yüzey alanı 4145 cm²/g, 45 µ elek üstü % 8,58'dir. Kimyasal analiz sonuçlarına göre; kızdırma kaybı % 7,19, Serbest CaO % 0,38, SiO₂ % 18,59, SO₃ % 2,89'dir (Tablo 1).

2.1.3. Uçucu Kül

Uçucu kül (öğütülmemiş) Kahramanmaraş İli Afşin Elbistan termik santralinden temin edilmiştir. Uçucu kül içerisinde yanmamış karbon tanelerinden oluşmakta ve koyu kahve renkindedir. Afşin Elbistan uçucu külünün fiziksel ve kimyasal özellikleri Gümüşhane Aşkale Çimento Fabrikası laboratuvarında ilgili deneylerin yapılması ile belirlenmiştir. Çalışmada kullanılan öğütülmemiş uçucu küle ait kıvama bağlı su ihtiyacı, genleşme ve priz süresi TS EN 196-3+A1 standardına göre belirlenmiştir (Tablo 2).

Uçucu külün farklı öğütme sürelerine (0, 10, 20, 30, 45 ve 60 dk) ait incelik değerleri TS EN 450-1 standardına bağlı olarak blaine incelik değerleri belirlenmiştir. Buna göre 0, 10, 20, 30, 45 ve 60 dk öğütme sürelerinde incelik değerleri sırasıyla 1860 cm²/g, 1870 cm²/g, 1945 cm²/g, 1975 cm²/g, 2005 cm²/g ve 2030 cm²/g olarak elde edilmiştir.

ASTM C 618 standardına göre; S+A+F (SiO₂ + Al₂O₃+ Fe₂O₃) toplamı ≥ % 70 ve CaO < % 10 ise F sınıfı (düşük kireçli), S + A + F (SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃) toplamı ≥ % 50 ve CaO > % 10 ise C sınıfı (Yüksek kireçli) uçucu kül olarak adlandırılmıştır. Buna göre Afşin

Elbistan uçucu külü S + A + F % 47,40, CaO % 37,84 olup, S+A+F miktarı % 50'den düşük ancak CaO miktarı % 10'dan büyük olduğundan C sınıfı uçucu kül sınıfında yer almaktadır. Kızdırma kaybı % 2,31, Serbest CaO % 4,51 ve 45 µ elek üstü % 50,68 elde edilmiştir (Tablo 2).

Tablo 2. Öğütülmemiş Uçucu külün kimyasal ve fiziksel özellikleri.

Kimyasal Analiz		Fiziksel Testler	
Bileşen, %	Uçucu Kül	Fiziksel Özellikler	Bileşenler
SiO ₂	29,24	İncelik (45 µ elek üstü %)	50,68
Al ₂ O ₃	11,49	Özgül Ağırlık (gr/cm ³)	2,54
Fe ₂ O ₃	6,67		
CaO	37,84	Özgül Yüzey (cm ² /gr)	1834
MgO	1,86		
Na ₂ O	0,38	Priz Başlangıcı (saat-dk)	2 saat-30 dk
K ₂ O	0,69		
SO ₃	4,70	Priz Sonu(saat-dk)	3 saat-15 dk
Cr ₂ O ₃	0,054		
Mn ₂ O ₃	0,059	Hacim Genişlemesi(mm)	0
P ₂ O ₅	0,494		
TiO ₂	0,49	Su İhtiyacı (%)	27,4
ZnO	0,001		
KK	2,31	Su miktarı (g)	137
Toplam	96,27		
SCaO	4,51		

2.2. Metot

Kullanılan uçucu kül Gümüşhane Üniversitesi, Maden Mühendisliği Laboratuvarındaki bilyeli değirmen kullanılarak öğütme işlemine tabi tutulmuştur. Uçucu külden farklı incelik değerleri elde etmek için 10, 20, 30, 45 ve 60 dk sürelerinde öğütülmüştür. Değirmende numunenin kullanıldığı hazne silindirik boyutta ve 6 lt kapasiteye sahip olup kuru ve toz halde öğütme işlemi yapılmıştır. 66 devir/dk dönme hızında, 1.75, 2, 3, 3.5 ve 4 cm bilya çaplarına sahip ve toplamda 105 adet bilya kullanılarak her bir öğütme süresi için 10 kg uçucu kül malzemesi öğütülmüştür.

Betonda karbonatlaşma olayı kimyasal olarak betonun işlenebilirliğini arttırmak için karışım suyu ilavesi, bunlu olduğu ortamda maruz kaldığı CO₂ ve ortam nemi tarafından gelişmektedir (Özer, 2012).

Betonarme yapılarda meydana gelen karbonatlaşma, kullanılan donatıda korozyona neden olmaktadır. Atmosferde asit oluşturan gazlar (CO₂ ve SO₂) karbonatlaşma gelişimini aşağıda belirtilen şekilde gerçekleştirmektedir. Gazların betonun gözenek sistemine işlenmesi ve gözenek suyu ile oluşturduğu reaksiyonlar denklem 1 ve 2'de, oluşan asitlerin gözenek suyu içinde çözülmüş olan çimentonun alkali bileşenleri ile ilgili reaksiyon denklem 3'te verilmiştir (Subaşı vd. 2011).



$$\text{pH} = 12.6 \quad \text{pH} = 8.3$$

Denklem 4'te görüldüğü üzere oluşan kalsiyum karbonatın pH değeri 8.3'tür. pH < 9.5 olması durumunda beton içerisindeki kullanılan çelik karbonatlaşmaya bağlı olarak özelliğini kaybeder. Karbonatlaşma, beton yüzeyinden başlayarak, içeriye doğru ilerlemekte ve yüzeyden 2,5-3,0 cm kadar ki bölgeler karbonatlaşmanın etkisi altındadır. Karbonatlaşmanın gerçekleşebilme hızı, havadaki karbondioksit ve nem miktarına, betonun geçirimsizliğine bağlıdır. Karbondioksit miktarının yüksek olması ve relatif nemin % 50 civarında olması karbonatlaşmayı artırmaktadır. Relatif nemin % 25'den az veya % 100 olması durumunda, karbonatlaşma gerçekleşmemektedir (Subaşı vd. 2011).

2.2.1. Uçucu kül Katkılı Betonlarda Karbonatlaşma Derinliğinin Belirlenmesi

Uçucu külün farklı inceliği (1860 cm²/g, 1870 cm²/g, 1945 cm²/g, 1975 cm²/g, 2005 cm²/g ve 2030 cm²/g) ve ikame oranlı (% 10, 30 ve 50) 10 x 20 cm boyutunda silindirik örnekler üzerine 20 ± 5 ° C'de kür havuzunda 28 gün bekletildikten sonra numuneler çıkarılarak laboratuvar ortamında kurumaya bırakılmıştır.

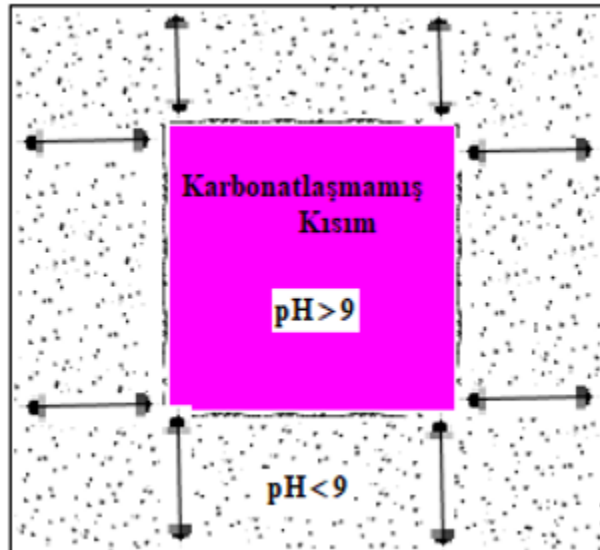
Beton örnekleri normal atmosferde bulunan CO₂ gazından daha yüksek oranda CO₂ gazı bulunan ve % 65 nem içeren ortamda 360 gün bekletilmiştir. Beton numuneleri TS EN 12390-6 standardı esas alınarak yarmada çekme dayanımı testi ile her bir numune iki eşit parçaya bölünmüştür. Karbonatlaşma derinliğinin belirlenmesi için pres yardımıyla ortadan iki eşit bölünen parçalara baz indikatörü olan % 1 phenolphtalein (C₂OH₁₄O₄) ve % 70 etil alkol'de çözülerek hazırlanan çözelti, numunenin iç yüzeyine püskürtülerek numunedeki renk değişimi gözlenmiştir (Şekil 3). Renk değişimi olduğu bölgelerde karbonatlaşma gelişmediği, renk değişiminin olmadığı kısımlarda ise karbonatlaşma meydana geldiği görülmüştür. Buna bağlı olarak renk değişiminin görülmeyen kısımların ölçümleri yapılarak karbonatlaşma derinliği BS EN 13293-2004 (Denklem 5) standartına göre belirlenmiştir.

$$\text{Karbonatlaşma Derinliği} = \frac{A_1 + A_2 + B_1 + B_2 + C_1 + C_2 + D_1 + D_2}{a} \quad (5)$$



Şekil 3. Karbonatlaşma deneyi, numunelerin ortadan ikiye ayrılması, Phenolphtalein (fenol fitalein) çözeltisi püskürtülmesi.

Çözeltinin beton numuneleri üzerine püskürtülmesi sonrasında oluşan renk değişimi kumpas vasıtasıyla ölçülmüştür. Ölçüm yapılan kısımlar Phenolphtalein sonrasında beton yüzeyinde renk değişimi olmayan yani pH değeri 9'un altında olan kısımlardır. Renk değişiminin yaşandığı mor bölgeler betonda alkali olduğu kısımları temsil etmektedir. Renk değişiminin olmadığı bölümler ise beton kısımları karbonatlaşma olayının olduğu kısımları temsil edip karbonatlaşma derinliğinin ölçüldüğü bölümlerdir. Karbonatlaşma derinliği (D) Şekil 4'te gösterildiği gibi renk değişiminin olmadığı kısımlar ölçülerek ortalamasının alınmasıyla sonuç değerleri elde edilmiştir.



Şekil 4. Karbonatlaşma derinliğinin ölçümü.

2.2.2. Betonda Aşınma Dayanımının Belirlenmesi

Aşınma dayanımı 10 x 20 cm boyutunda silindirik boyutta farklı incelikte ve ikame oranlarında beton bileşiminde çimento yerine uçucu külün ikame edilmesi sonucu hazırlanan katkılı ve katkısız beton örneklerinin kalıp yüzeyleri üzerine aşınma işlemi uygulanarak belirlenmiştir. Aşınma dayanımı beton örneklerinin 28, 56 ve 90 günlük kür süresi sonunda ve ASTM C 944-99 methoduna göre yapılmıştır. Deneye başlamadan önce kür süresini tamamlamış numuneler kür tankından çıkarılarak laboratuvar ortamında 1 gün kuruması için bekletilmiştir (Şekil 5). Kuruyan numunelerin tartımı alınarak 0 dk ölçüm değeri kaydedilmiştir (Şekil 5). Daha sonra deney numuneleri üzerine 197 N kuvvet uygulanacak şekilde 200 devir/dakika hızında dönen aşındırıcı disk altına 2 dk, 4 dk, 6 dk aralıklarında bırakılmış ve aşınma sonucu ağırlık değişim değerleri ölçülmüştür (Şekil 5).

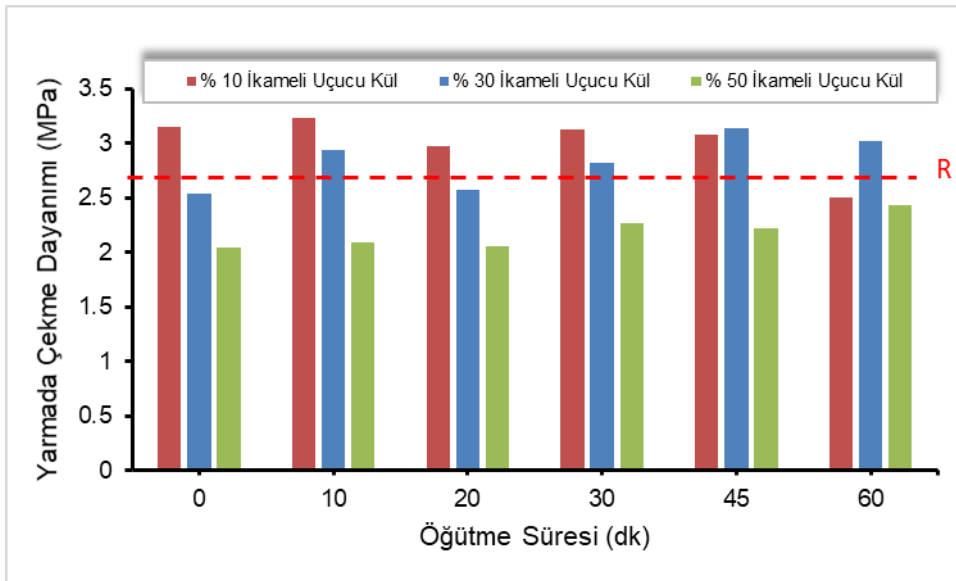


Şekil 5. Aşınma Deneyi; örneklerin laboratuvar ortamında kurutulması, numunelerin tartılması, aşındırma işlemi

3. Araştırma Sonuçları ve Tartışma

3.1. Yarmada Çekme Dayanımı Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Karbonatlaşmaya tabii tutulan prizma şekilli numunelere ait yarmada çekme dayanımı sonuçları Şekil 6'da verilmiştir. Karbonatlaşma numunelerinin arasında en yüksek yarmada çekme dayanımı değeri 10 dakika öğütme süresine sahip % 10 uçucu kül ikameli beton örneğinde (3.24 MPa), en düşük yarmada çekme dayanım değeri ise 0 dakika öğütme süresine sahip % 50 uçucu kül ikameli beton örneğinde elde edilmiştir.



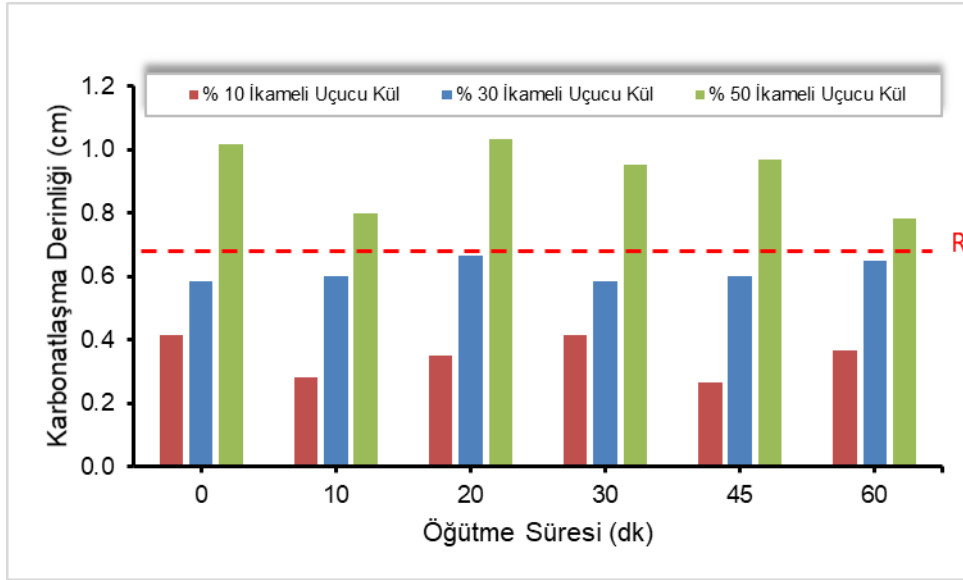
Şekil 6. Yarmada Çekme Dayanımı Sonuçları.

Şekil 6'da görüldüğü üzere uçucu külün ikame miktarı arttıkça 45 ve 60 dakika öğütme süreleri hariç genel olarak yarmada çekme dayanımını azalmaktadır. Ayrıca % 10 ve % 50 uçucu kül ikameli beton numunelerinde öğütme süresinin yarmada çekme dayanımını üzerinde pek fazla etkili olmadığı, % 30 uçucu kül ikameli beton numunelerinde öğütme süresinin yarmada çekme dayanımını artırdığı görülmektedir. Bunlara ek olarak, referans beton numunesinin yarmada çekme dayanımı sonucunu 0 dakika öğütme süresine sahip %

10 uçucu kül ikameli, 10 dakika öğütme süresine sahip % 10 ve % 30 uçucu kül ikameli, 20 dakika öğütme süresine sahip % 10 uçucu kül ikameli, 30 dakika öğütme süresine sahip % 10 ve % 30 uçucu kül ikameli, 45 dakika öğütme süresine sahip % 10 ve % 30 uçucu kül ikameli ve 60 dakika öğütme süresine sahip % 30 uçucu kül ikameli beton karışımlarında geçtiği görülmektedir. Uçucu kül katkı oranının beton bileşimi içerisinde artması yarmada çekme dayanımında düşüşlere neden olmuştur. Günindi (2005) çalışmasında % 0 - % 40 oranında ikame edilen Yumurtalık Sugözü uçucu kül katkılı betonların basınç, yarmada çekme ve çekme dayanımlarını incelemiştir. Elde ettiği yarmada çekme dayanım sonuçlarına göre genel olarak % 10 oranında uçucu kül içeren betonların yarmada çekme dayanımlarının kontrol betonların yarmada çekme dayanımlarıyla çoğunlukta eşdeğere yakın çıkmıştır. % 20 - 40 oranında ikame edilen uçucu kül katkısının yarmada çekme dayanımında düşüşler yarattığını belirlemiştir. Özellikle uçucu kül gibi mineral katkıların karbonatlaşma derinliği ancak uçucu külün tane boyutunun küçültülmesi ile geçirimsiz betonlar üretmekle azaltılabilir. Bu çalışmada uçucu kül için kullanılan farklı öğütme süreleri için elde edilen incelik değeri geçirimsizliği sağlamak için yeterli gelmeyip karbonatlaşma derinliğini uçucu kül ikamesindeki artışa bağlı olarak arttırmıştır. Bunun yanında uçucu külün çimento hidratasyonu sonucu oluşan Ca(OH)_2 'i bağlaması sonucu ortamın pH değerini (karbonatlaşma olayının oluşumu için $\text{pH} < 9$) düşürdüğü ve karbonatlaşma derinliğini arttırmıştır (Özer, 2012). Ayrıca çalışmada kullanılan C tipi uçucu kül yüksek kireç içeriğine sahip olduğundan karbonatlaşma görülme oranı çimento hidratasyon ürünlerinden ziyade uçucu külün kendi kimyasal bileşiminden kaynaklanmaktadır.

3.2. Karbonatlaşma Sonuçlarının Değerlendirilmesi

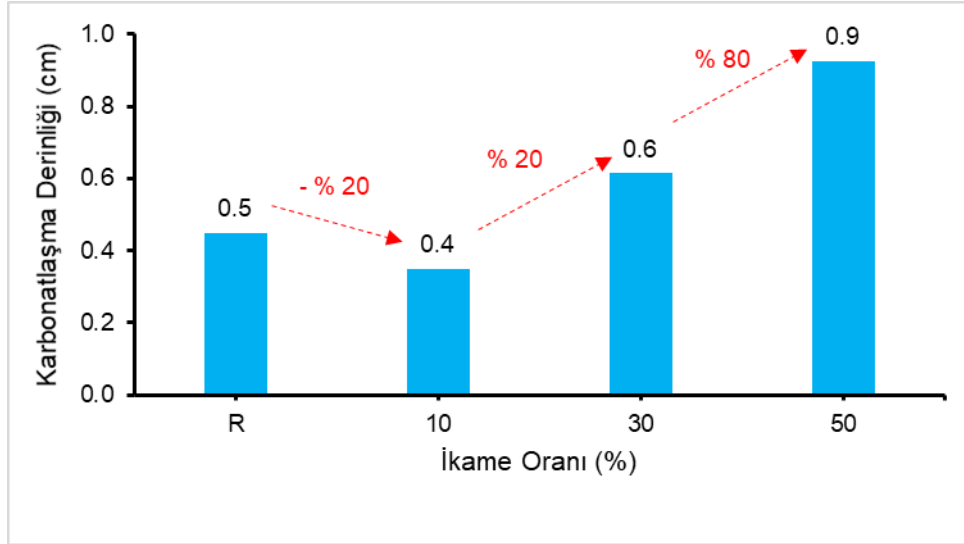
Farklı öğütme sürelerine bağlı olarak belirli oranlarda ikame edilen uçucu kül (UK) içeren beton karışımlarının karbonatlaşma deney sonuçları Şekil 7'de görülmektedir. En yüksek karbonatlaşma derinliği değeri 0, 20, 30 ve 45 dakika öğütme sürelerine sahip % 50 UK ikameli beton örneğinde (1,0 cm), en düşük karbonatlaşma derinliği değeri (0.3 cm) ise 10 ve 45 dakika öğütme süresine sahip % 10 UK ikameli beton örneklerinde elde edilmiştir.



Şekil 7. Karbonatlaşma Sonuçları.

Beton karışımlarında kullanılan UK'ün öğütme süresinin artmasıyla birlikte karbonatlaşma derinliği üzerinde pek fazla değişikliğe neden olmadığı görülmektedir. % 10 ikameli UK içeren beton karışımında 10 ve 45 dakikalık öğütme sürelerinde karbonatlaşma derinliği miktarının düştüğü, % 50 ikameli UK içeren beton karışımında 10 ve 60 dakikalık öğütme sürelerinde karbonatlaşma derinliği miktarının düşmektedir. % 30 ikameli UK içeren beton karışımında ise 20 ve 60 dakikalık öğütme sürelerinde karbonatlaşma derinliği miktarının arttığı görülmektedir. Ayrıca referans beton numunesinin karbonatlaşma derinliği değerini (0,5 cm); 0, 10, 20, 30, 45 ve 60 dakika öğütme sürelerine sahip % 30 ve % 50 UK ikameli beton karışımlarında geçildiği görülmektedir. % 10 ikameli UK beton karışımı ise bu değerın altında kalmıştır (Şekil 7).

Uçucu külün farklı inceliği (1860 cm^2/g , 1870 cm^2/g , 1945 cm^2/g , 1975 cm^2/g , 2005 cm^2/g ve 2030 cm^2/g) ve farklı ikame (% 10, 30 ve 50) oranlarıyla hazırlanan beton örneklerinde uçucu kül inceliğinin artması, çimento matrisinin geçirimsizliğini azaltmaya yeterli gelmemiştir. Çünkü uçucu külün 60 dk öğütme sonrasında elde edilen blaine incelik değeri 2030 cm^2/g olup 3500 cm^2/g çimento blaine incelik değerine göre düşük olması geçirgenlik özelliğini arttırmış, karbonatlaşma direncini ise azaltmıştır.

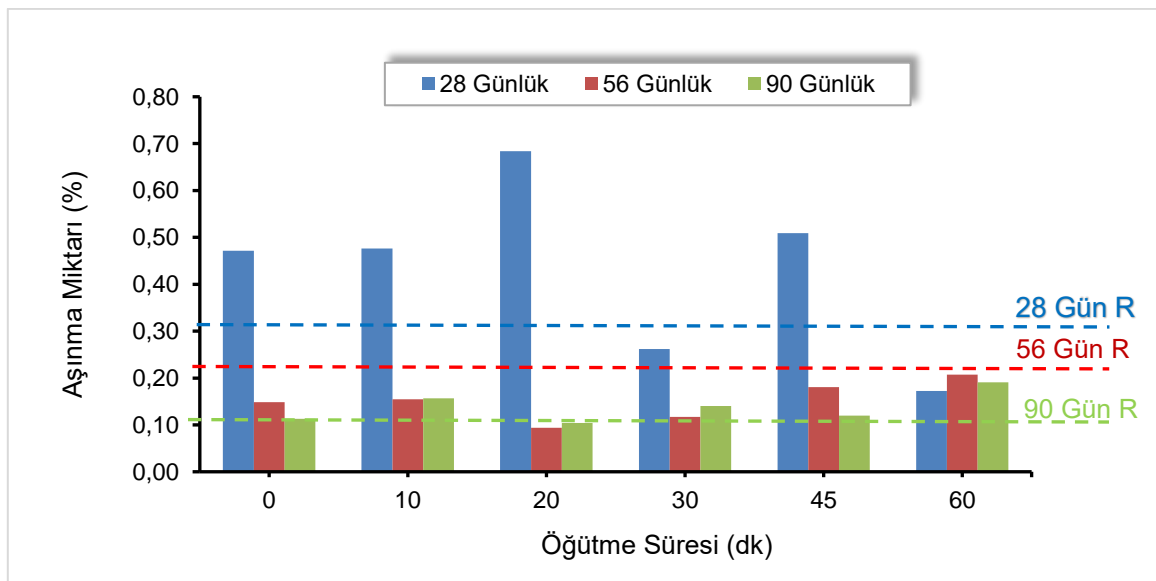


Şekil 8. İkame Oranının Karbonatlaşmaya Etkisi.

Şekil 8’de 0, 10, 20, 30, 45 ve 60 dk öğütülmüş ve beton içerisinde çimento yerine % 10, % 30 ve % 50 oranlarında ikame edilen uçucu külün ortalama değerleri alınarak referans değerine göre artış ve azalış yüzdeleri verilmiştir. UK ikame oranı arttıkça karbonatlaşma derinliğinin % 30 ve % 50 UK ikameli beton karışımlarında arttığı, % 10 ikameli UK beton örneğinde azaldığı görülmektedir. Referans beton numunesine göre UK ikameli beton örneklerinin karbonatlaşma derinliği % 10 UK ikameli beton örneğinde % 20 azalırken, % 30 UK ikamesi karbonatlaşma derinliğini % 20 artırmakta ve % 50 UK ikamesi ise karbonatlaşma derinliğini % 80 artırmaktadır. Yapılan çalışmada uçucu kül inceliğinin karbonatlaşma direnci üzerinde belirleyici bir etki yaratmadığı ancak % 10 ve % 30 uçucu kül katkısı ile hazırlanan beton örneklerinde karbonatlaşma derinliğini referans betona göre azalttığını, % 50 ikame oranında ise artırıcı etki yarattığı gözlemlenmiştir. Ramyar (1993) çalışmasında Türkiye’de birkaç termik santralden aldığı uçucu külleri kullanarak çimento harcının büzülmesi ve betonun karbonatlaşma üzerine etkisini incelemiştir. Beton içerisinde % 10 ve % 20 uçucu kül içeren numunelerin kontrol numunesine yakın ya da daha az karbonatlaşma derinliği göstermişken % 40 oranında uçucu kül kullanımının karbonatlaşma derinliğini arttırdığını göstermiştir. Park, (1995); Mindes, (2002); Beak vd., (2003); Topçu, (2006); Subaşı vd., (2011) çalışmalarında olduğu gibi uçucu kül ikame oranının artmasıyla karbonatlaşma derinliğinin de arttığı görülmektedir. Ancak bazı durumlarda uçucu külün beton içerisinde kullanımı karbonatlaşma direncini artırmaktadır. Özellikle uçucu küllerin daha ince taneli olması erken kür zamanında dolgu etkisi yaparak uzun kür ve iyi kürlenmesi sonucu oluşan C-S-H yapıları sonucu boşlukları doldurması ve geçirimsizliği azalması karbonatlaşma direncini arttırmayada katkı sağlamaktadır (Ruixia, 2010).

3.2. Aşındırma Sonuçlarının Değerlendirilmesi

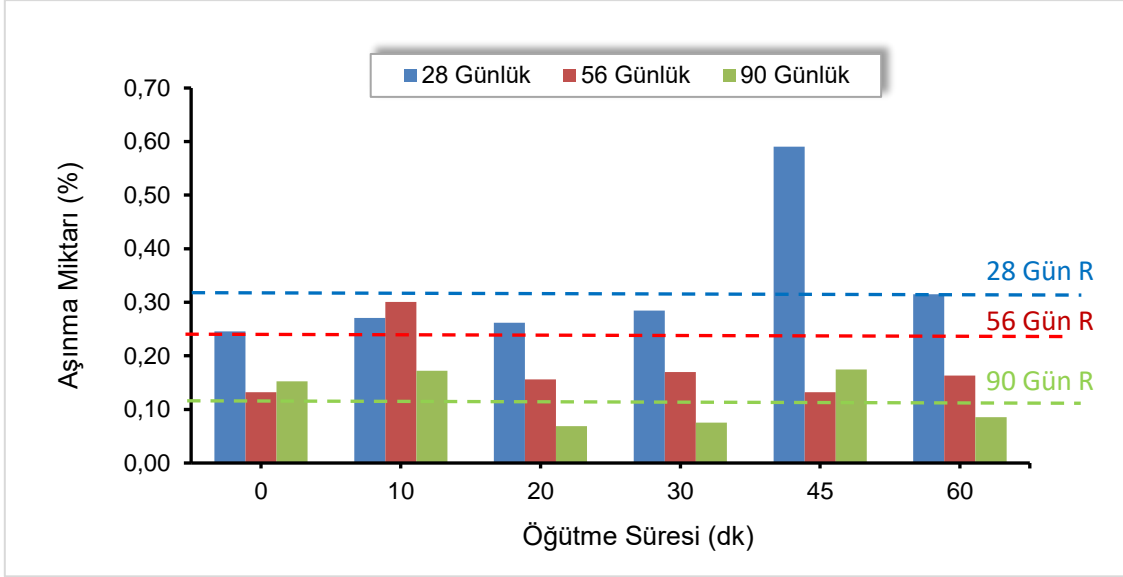
Farklı öğütme sürelerine bağlı olarak belirli oranlarda ikame edilen uçucu kül (UK) içeren beton karışımlarının aşınma miktarları Şekil 9, 10 ve 11’de verilmiştir.



Şekil 9. % 10 Uçucu Kül İkameli Beton Karışımlarının Aşındırma Sonuçları.

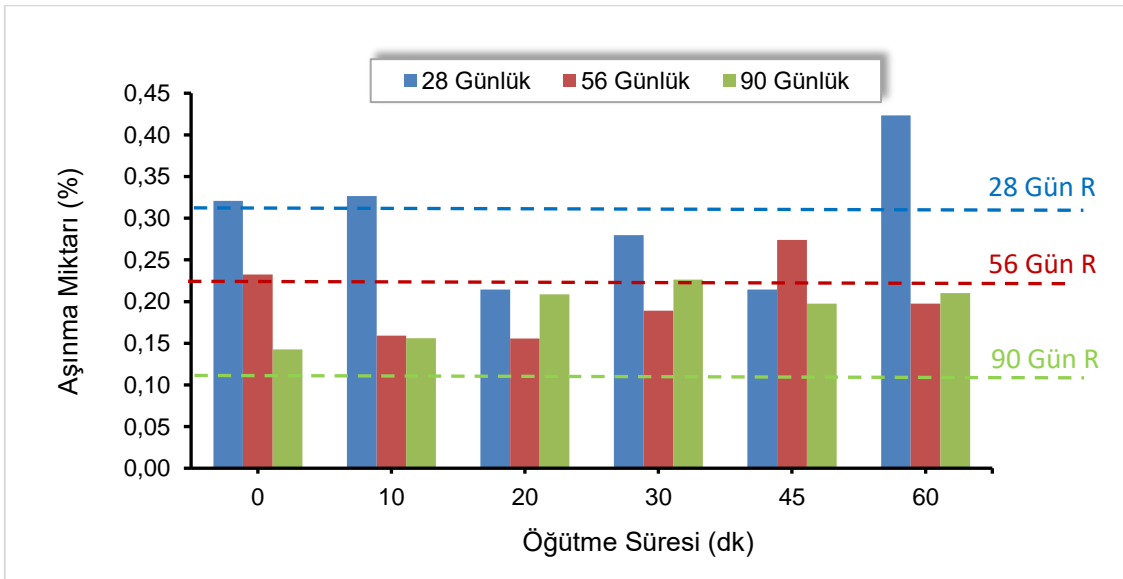
Şekil 9’da görüldüğü üzere % 10 UK ikameli beton karışımları içerisinde 28, 56 ve 90 günlük kür sürelerinde en yüksek aşınma miktarı değerleri sırasıyla; 0,68 g (20 dk öğütme), 0,21 g (60 dk öğütme), ve 0,19 g (60 dk öğütme) olarak ölçülmüştür. 28, 56 ve 90 günlük kür sürelerinde en düşük aşınma miktarları ise sırasıyla 0,17 g (60 dk öğütme), 0,09 g (20 dk öğütme), 0,11 g (0 dk öğütme) e-ISSN: 2148-2683

olarak hesaplanmıştır. Ayrıca % 10 UK ikameli beton karışımları içerisinde en fazla aşınma miktarı 28 günlük kür süresinde meydana gelmektedir. Öğütme süresi arttıkça 28 günlük kür süresi numunelerinin aşınma miktarlarında genel olarak arttığı söylenebilir, ama 56 ve 90 günlük kür sürelerinde pek etkili olduğu söylenemez. Buna ilaveten, kür süresi arttıkça genel olarak aşınma miktarının azaldığı görülmektedir. 28 günlük kür süresinde neredeyse bütün öğütme sürelerinde (60 dk hariç) referans numune değerini aştığı, 90 günlük kür süresinde ise bütün öğütme sürelerinde (20 dk hariç) referans numune değerini aştığı görülmektedir. 56 günlük kür süresinde referans numune değerini geçen karışım bulunmamaktadır.



Şekil 10. % 30 Uçucu Kül İkameli Beton Karışımlarının Aşındırma Sonuçları.

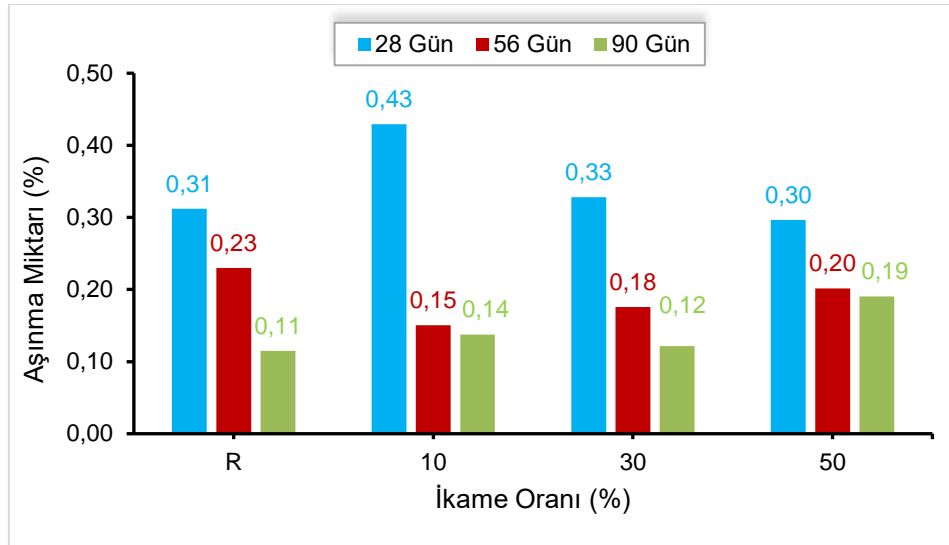
% 30 UK ikameli beton karışımları içerisinde 28, 56 ve 90 günlük kür sürelerinde en yüksek aşınma miktarı değerleri sırasıyla; 0,59 g (45 dk öğütme), 0,30 g (10 dk öğütme), ve 0,17 g (10 ve 45 dk öğütme) olarak ölçülmüştür. 28, 56 ve 90 günlük kür sürelerinde en düşük aşınma miktarları ise sırasıyla 0,25 g (0 dk öğütme), 0,13 g (0 ve 45 dk öğütme), 0,08 g (30 dk öğütme) olarak hesaplanmıştır. Ayrıca % 30 UK ikameli beton karışımları içerisinde en fazla aşınma miktarı 28 günlük kür süresinde meydana gelmiştir. Öğütme süresinin artmasıyla 28, 56 ve 90 günlük kür süresine sahip numunelerinin aşınma miktarlarında pek bir değişiklik olduğu söylenemez. 28 günlük kür süresinde sadece 45 dk öğütme süresinde referans numune değerini aştığı, 56 günlük kür süresinde ise sadece 10 dk öğütme süresinde referans numune değerini aştığı görülmektedir. 90 günlük kür süresinde ise referans numune değerini 0, 10 ve 45 dk öğütme sürelerinde geçmiştir (Şekil 10).



Şekil 11. % 50 Uçucu Kül İkameli Beton Karışımlarının Aşındırma Sonuçları.

Şekil 11'de görüldüğü üzere; % 50 UK ikameli beton karışımları içerisinde 28, 56 ve 90 günlük kür sürelerinde en yüksek aşınma miktarı değerleri sırasıyla; 0,42 g (60 dk öğütme), 0,27 g (45 dk öğütme), ve 0,23 g (30 dk öğütme) olarak ölçülmüştür. 28, 56 ve 90 günlük kür sürelerinde en düşük aşınma miktarları ise sırasıyla 0,21 g (20 ve 45 dk öğütme), 0,16 g (10 ve 20 dk öğütme), 0,14 g (0 dk öğütme) olarak hesaplanmıştır. Ayrıca % 50 UK ikameli beton karışımları içerisinde en fazla aşınma miktarı 28 günlük kür süresinde meydana gelmiştir. Öğütme süresinin artmasıyla 28, 56 ve 90 günlük kür süresine sahip numunelerin aşınma miktarlarında pek bir

değişiklik olduğu söylenemez. 28 günlük kür süresinde 0, 10 ve 60 dk öğütme sürelerinde referans numune değerini aştığı, 56 günlük kür süresinde ise 0 ve 45 dk öğütme sürelerinde referans numune değerini aştığı görülmektedir. 90 günlük kür süresinde ise referans numune değerini bütün öğütme sürelerinde geçmiştir.



Şekil 12. İkame Oranının Aşındırmaya Etkisi.

Şekil 12'deki gibi; 0, 10, 20, 30, 45 ve 60 dk öğütülmüş ve beton içerisinde çimento yerine % 10, % 30 ve % 50 oranlarında ikame edilen uçucu külün ortalama değerleri alınarak aşınma miktarları belirlenmiştir. 28 günlük kür süresinde UK ikame oranı arttıkça aşınma miktarı azalmaktadır. 56 ve 90 günlük kür serelerinde ise UK ikame oranı arttıkça aşınma miktarında genel olarak artmıştır.

Referans beton numunesine göre 28 günlük kür süresinde % 10 ve 30 UK ikameli beton örneklerinin aşınma miktarları daha fazla değer aldığı, 56 günlük kür süresinde referans numunesinin değerini geçen karışım oranı olmadığı ve 90 günlük kür süresinde ise bütün ikame oranlarında referans numune değerinin aşıldığı görülmektedir. Genel olarak uçucu kül ikameli betonlarda aşınma direnci üzerine mineral katkıların etkisinin yanı sıra farklı faktörlerin etkisi de mevcuttur. Aşınma direnci numunelerin basınç dayanımı, agregaya ait özellik ve çeşitine, kür şartları ve yüzey durumuna bağlı değişiklik göstermektedir. 90 günlük aşınma miktarının referans beton örneğine göre yüksek çıkması betonun hidrasyon sürecinin devam etmesiyle ve bu durumda aşınmayı artırıcı özelliklerin ortaya çıkması etkili olmuştur (Akçaözöglü, 2017). Beton içerisinde uçucu kül kullanımının sertleşmiş betonun aşındırma direnci üzerine etkisi daha öncesinde yapılan çalışmalara göre uçucu kül katkı miktarının betonda artmasıyla aşındırma direncinin azaltmasına neden olduğu düşünülmektedir. Günindi (2005) çalışmasında % 10- 40 oranında uçucu kül katkılı betonların ilk günlerde yeterli basınç değeri elde edilememesine bağlı aşınma direncinin düşük olduğunu belirtmiştir. İlerleyen zamanda uçucu kül ikamesindeki artışa bağlı olarak aşınma direncinin arttığını ortaya koymuştur. Benzer sonuçları Gebler ve Klieger (1986) ile Atiş (2000) çalışmalarında yüksek miktarda uçucu kül kullanarak ürettikleri beton örnekleri içerisinde uçucu kül miktarının artmasıyla aşınma direncinde arttırmasında da görülmektedir.

4. Sonuç

Yapılan bu çalışmada C tipi uçucu kül, bilyalı değirmende 0, 10, 20, 30, 45 ve 60 dk öğütülmüş ve beton içerisinde çimento yerine % 10, % 30 ve % 50 gibi yüksek oranlarda ikame edilmiştir. Elde edilen farklı incelik ve ikame oranlı uçucu kül (UK) katkılı betonlar ile referans betonun karbonatlaşma ve aşınma dirençleri belirlenmiştir.

% 10 ve % 50 uçucu kül ikameli beton numunelerinde öğütme süresinin yarmada çekme dayanımı üzerinde pek fazla etkili olmadığı, ama referans numuneye göre uçucu kül ikamesinin dayanımı artırdığı söylenebilir. % 30 uçucu kül ikameli beton numunelerinde öğütme süresinin yarmada çekme dayanımını çok az artırdığı görülmektedir, ancak bu karışım oranında referans numunenin elde ettiği dayanım değerinin altında değer almıştır.

Beton karışımlarına ikame edilen uçucu kül oranlarının artmasıyla birlikte karbonatlaşma derinliği değeri de artmıştır. En yüksek karbonatlaşma derinliği değeri 0, 20, 30 ve 45 dakika öğütme sürelerine sahip % 50 UK ikameli beton örneğinde (1,0 cm), en düşük karbonatlaşma derinliği değeri (0,3 cm) ise 10 ve 45 dakika öğütme süresine sahip % 10 UK ikameli beton örneklerinde elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre; beton karışımlarında kullanılan UK'ün öğütme süresinin karbonatlaşma derinliği üzerinde pek fazla değişikliğe neden olmadığı görülmüştür.

% 10, 30 ve 50 UK ikameli beton karışımları içerisinde en fazla aşınma miktarı 28 günlük kür süresinde meydana gelmiştir. % 10 UK ikameli beton karışımında öğütme süresi arttıkça 28 günlük kür süresi numunelerinin aşınma miktarında genel olarak arttığı söylenebilir, ama 56 ve 90 günlük kür sürelerinde pek etkili olduğu söylenemez. Diğer UK ikame oranlarında (% 30 ve 50) öğütme süresinin artmasıyla 28, 56 ve 90 günlük kür süresine sahip numunelerinin aşınma miktarlarında pek bir değişiklik olduğu söylenemez.

Kaynakça

- Archarya, P., K., ve Patro, S.K., (2016). Strength, sorption and abrasion characteristics of concrete usingferrochrome ash (FCA) and lime as partial replacement of cement, *Cement and Concrete Composites*, 74, 16-25.
- Akçaözöglü, K., Güldür, Ş., M., (2017). Mikrokronize kalsit ve uçucu kül katkısının beton özelliklerine etkisinin araştırılması, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 17, 025603 (658-668).
- Akman, M., S., (1992). Deniz yapılarında beton teknolojisi, İstanbul Teknik Üniversitesi Gemi İnşaatı ve Deniz Bilimleri Fakültesi Baskı Atölyesi; Yayın No:1481, 27, 175.
- ASTM C 944-99, (1999). Standard test method for abrasion resistance of concrete or mortar surfaces by the rotating-cutter method, American Society For Testing and Materials, USA.
- ASTM C 618-19, (2019). Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019, www.astm.org.
- Atiş, C., D., (2000). Yüksek oranda uçucu kül kullanımı ile betonun aşınması, *İMO Teknik Dergi*, Yazı 154, 11(4) 2217-2230.
- Beak, M., S. Kim, W., S., Kim, J., W., Kim, J.S., Kim, S.S., Jung, S.J., (2003). the experimental study on neutralization properties of high volume fly-ash concrete, *Proc. Spring KCI Conference* 15 (1), 69-74.
- Bilim, C., (2011). Zeolit katkısının harçların aşınma direncine etkisi, 6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11), 16-18 May 2011, Elazığ, Turkey.
- Borges, P. H. R., Costa, J. O., Milestone, N. B., Lynsdale, C. J., Streatfield, R. E., (2010). Carbonation of ch and c-s-h in composite cement pastes containing high amounts of BFS. *Cem. Concr. Res.* 40, 284-292.
- BS EN 13293 (2004). Products and systems for the protection and repair of concrete structures-test methods-determination of resistance to carbonation, (2004).
- Da Silva, S. R. ve De Oliveira Andrade, J.J., (2017). Investigation of mechanical properties and carbonation of concretes with construction and demolition waste and fly ash, *Constr. Build. Mater.* 153, 704-715.
- Erdoğan, T., Y., (1997). Admixtures for concrete, Middle East Technical University Press, Ankara, Turkey.
- Erdoğan, T., Y., (2003). Beton, ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayını, 191-502-518s. Ankara.
- Gebler, S., H., Klieger, P., (1986). Effect of fly ash on the durability of air entrained concrete, *Proceedings of ACI/Canmed Second International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete SP-91, SPAIN-Madrid*, pp. 483-519.
- Günindi, İ., (2005). Yumurtalık Sugözü uçucu külü içeren betonların basınç, eğilme, aşınma dayanımlarının araştırılması, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilemleri Enstitüsü inşaat Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi.
- Langa, B. V., Joshi, R. C., Ward, M. A., (1990). Strength and durability of concrete containing 50 percent portland cement replacement by fly ash and other materials, *Can.J. Civil Eng.*, 17(1), 19-27.
- Liu, T., C., (1989). Abrasion resistance of concrete, *ACI J.*, 86 (5), 507-514.
- Mehta, P., K., (1993). Pozzolanic and cementitious by-products as mineral admixtures for concrete – a critical review, *Proc. 1st Int. Conf. on the Use of fly ash, silica fume, slag and other mineral by-products in concrete*, ACI SP-79, American Concrete Institute, Detroit, pp. 1-48.
- Mindess, S., Young, J.F., Darwin, D., (2002). *Concrete*, 2nd ed., Prentice Hall, New Jersey, USA.
- Morandau, A., Thiéry, M., Dangla, P., (2014). Investigation of the carbonation mechanism of ch and c-s-h in terms of kinetics, microstructure changes and moisture properties, *Cem. Concr. Res.* 56, 153-170.
- Naik, T., R., Singh, S., S., Hossain, M., M., (1995). Abrasion resistance of high-strength concrete made with class C fly ash, *ACI Mater. J.*, 92 (6), 649-659.
- Naik, T., R., Singh, S. S., Rammer, B., W., (1998). Mechanical properties and durability of concrete made with blended fly ash, *ACI Mater. J.*, 95(4), 454-462.
- Özer, Ş., (2012). Farklı çimentoların betondaki karbonatlaşmaya etkisinin araştırılması, Fırat Üniversitesi, Fen Bilemleri Enstitüsü Yapı Eğitimi Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi.
- Papadakis, V.G., Vayenas, C.G., Fardis, M.N., (1991). Fundamental modeling and experimental investigation of concrete carbonation, *Mater. J.* 88, 73-363.
- Park, G., K., (1995). Durability and carbonation of concrete, *Mag. KCI* 7 (2), 74-81.
- Ramyar, K., (1993). Uçucu küllerin çimento harcının büzülmesine ve betonun karbonatlaşmasına olan etkileri, *Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu*, TMMOB Ankara Şubesi, 133-147.

Ramyar, K., (2007). Portland çimentosu – süperakışkanlaştırıcı katkı uyumunu etkileyen faktörler, 2. Yapılarda Kimyasal Katkılar Sempozyumu ve Sergisi, Ankara.

Rashad, A., M., (2015). A brief on high-volume class f fly ash as cement replacement – a guide for civil engineer, International Journal of Sustainable Built Environment, 4, 278-306.

Reis, R., Malheiro, R., Camões, A., Ribeiro, M., (2014). Carbonation resistance of high volume fly ash concrete, Key Eng. Mater., 634, 288–299.

Ruixia, E., (2010). A Study on carbonation for low calcium fly ash concrete under different temperature and relative humidity the electronic, J. Geotech. Eng. 15, 1871–1877.

Subaşı, S., Beycioğlu, A., Çomak, B., (2011). Puzolan katkısının betonun karbonatlaşma derinliğine etkisi, Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, Sayı 24, ISSN-1302-3055.

Siddique, R. (2003). Effect of Fine Agregate replacement with class f fly ash on the abrasion resistance of concrete, Cem. Concr. Res. 33(1), 877-1881.

Siddique, R. (2004). Performance characteristics of high-volume Class F fly ash concrete, Cement and Concrete Research 34, 487 – 493.

Siddique, R., Khatib, J.M., (2010). Abrasion resistance and mechanical properties of high-volume fy ash concrete, Materials and Structures, 43:709–718.

Siddique, R., Prince, W., Kamalı, S., (2007). Influence of utilization of high-volumes of class f fly ash on the abrasion resistance of concrete, Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies, p. 13-28.

Şahin, Y., E., (2004). Linyosülfanet esaslı beton katkılarının beton performansına etkileri, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilemleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı malzemesi Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi.

Teixeira, E. R., Camões, A., Branco, F. G., Aguiar, J. B., Fanguero, R., (2019). Recycling of biomass and coal fly ash as cement replacement material and its effect on hydration and carbonation of concrete, Waste Management 94, 39–48

Tikal'sky, P., J., Carrasquillo, P., M., Carrasquillo, R., L., (1988). Strength and durability considerations affecting mix proportions of concrete containing fly ash, ACI Master, J., 86 (6), 505-511.

TS EN 12390-6, (2010). Beton - sertleşmiş beton deneyleri - bölüm 6: deney numunelerinin yarmada çekme dayanımının tayini, TSE.

TS 802, (2016). Beton karışım tasarımı hesap esasları, TSE.

Yazıcıoğlu, S., Demirel, B., Gönen, T., Özer, Ş., (2012). Farklı tip çimentoların betonun karbonatlaşmasına etkisi, SDU International Journal of Technologic Sciences, Vol. 4, No 3, pp. 112-120.

TS EN 196-3 +A1, (2010). Çimento deney yöntemleri - bölüm 3: priz süreleri ve genleşme tayini, TSE.

TS EN 450-1, (2013). Uçucu kül-betonda kullanılan-bölüm:1 tarif, özellikler ve uygunluk kriterleri, Türk Standartları Enstitüsü, 27 s, Ankara.

Topçu, İ. B., (2006). Yapı malzemeleri ve beton deneyleri el kitabı, Eskişehir.