

Araştırma Makalesi

Uçucu Kül ve Silis Duman Katkılı Betonların Mekanik Özelliklerinin XRD İle İncelenmesi

Burhan Uzbaş, Abdulkadir Cüneyt Aydın*

Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, Erzurum, 25030, Türkiye

Öz

Bu çalışmada, çimento yerine değişik oranlarda uçucu kül ve silis dumanının tekli ve ikili olarak kullanılmasının hidrasyon ürünlerine (C-S-H ve CH) ve betonun mekanik ve mikroyapı özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Portland çimentosu yerine ağırlıkça %5, %10, %15 ve %20 oranında uçucu kül, silis dumanı ve silis dumanı + uçucu kül kullanılmıştır. Basınç dayanım testine tabii tutulan numunelerin mikroyapıları X-ışını kırınımı (XRD) kullanılarak incelenmiştir. Sonuçlara göre, uçucu kül 7 günlük betonun basınç dayanımı olumsuz etkilerken 28 ve 90 günlük yaşlarda ise basınç dayanımını artırdığı görülmüştür. Silis dumanı kullanılan betonlarda ise her yaşta kontrol numunesine kıyasla daha yüksek basınç dayanımı elde edilmiştir. En yüksek basınç dayanımı, çimento yerine, uçucu kül %10, silis dumanı %15, silis dumanı + uçucu kül %15 oranında kullanıldığında elde edilmiştir. XRD analizinde, hidrasyon sonucu oluşan portlandit (CH (Ca(OH)₂)) oranın yaşa ve kullanılan uçucu kül ve silis dumanı oranına bağlı olarak azaldığı görülmüştür. Bunun sebebi, uçucu kül ve silis dumanının CH ile yapmış olduğu reaksiyonun bir sonucudur. Bu çerçevede uçucu kül, silis dumanı ve bunların birlikte kullanımı betonların mikroyapı gelişimi 90 günlük süreçte değerlendirilmiş, içyapıdaki gelişimin dayanımla değişimi desteklenmeye çalışılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Uçucu kül, silis dumanı, betonun mikro yapısı, XRD, CH, C-S-H

XRD Analysis of Mechanical Properties of Containig Fly Ash and Silica Fume Concrete

Abstract

In this study, the effects of single and double use of fly ash and silica fume on the mechanical and microstructural properties of the hydration products (C-S-H ve CH) and concrete were investigated at various ratios instead of cement. Portland cement was replaced with fly ash and silica fume and fly ash+silica fume in quantities of 5%, 10%, 15%, and 20% (in terms of weight) of cement. The microstructures of the samples subjected to the compressive strength test were examined using X-ray diffraction (XRD). According to the results, the fly ash adversely affected the compressive strength of the 7 day concrete, while it increased the pressure strength at 28 and 90 days of age. In concretes using silica fume, higher compressive strength is obtained compared to control samples at every age. The highest compressive strength was obtained when cement was replaced by fly ash 10%, silica fume 15%, silica fume + fly ash 15%. XRD analysis showed that the ratio of portlandite (CH

* Sorumlu Yazar
e-mail: burhanuzbas@gmail.com

Received:19.03.2018
Accepted: 28.09.2018

(Ca(OH)₂), which is formed as a result of hydration, decreases with age and the ratio of fly ash and silica as used. This is the result of the reaction of fly ash and silica fume with CH. In this framework, fly ash, silica fume and their combined use microstructure development of concrete were evaluated in 90 day period.

Keywords: Fly ash, silica fume, concrete microstructure, XRD, CH, C-S-H

Giriş

Beton yeryüzünde en yaygın olarak kullanılan yapı malzemesidir. Çok fazlı kompozit bir malzeme olan beton, genel olarak çimento esaslı bağlayıcılar kullanılarak üretilir [1]. Betonun önemli bir parçası olan çimento yapıların maliyetinde önemli bir rol oynamaktadır. Sınırlı kaynakların bir sonucu olarak çimento yerine puzolanik malzemeleri içeren doğal kaynakların kullanılması giderek daha da önem kazanmaktadır [2]. Bu doğrultuda düşük maliyetli ve kolay erişilebilir malzemelerin betonda kullanılması uygulaması son yıllarda geniş bir çalışma alanı oluşturmuştur [3]. Bu sebeple beton içinde çimento yerine uçucu kül ve silis dumanı gibi katkıların kullanılması sürekli araştırma konusu olmuştur.

Beton yaygın olarak kullanılan bir malzeme olduğu halde, betonun heterojen yapısı istenmeyen olumsuz etkilere neden olabilmektedir [4]. Betonun çok tüketilmesi çimento üretimini artırmaktadır. Portland çimentosunun kullanımını en aza indirerek CO₂ salınımı azaltmak için son zamanlarda birçok

çalışma gerçekleştirilmiştir. Betonda çimento yerine uçucu kül, silis dumanı, öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu ve metakaolin gibi malzemelerinin kullanılması çimento tüketimini azaltmak için çimento endüstrisi tarafından ciddiyle ele alınmaktadır [5]. Beton üretiminde çimentoya ilave olarak uçucu kül kullanılması, CO₂ emisyonunun azaltılması için faydalıdır [6].

Betonun, çimento hamuru içinde gömülü agregalardan oluşan bir kompozit olarak değerlendirilmesi uygundur [7]. Betonun içyapısı çimentonun hidratasyonu ile mukavemet kazanmaktadır. Hidratasyon olayı su ile çimento bileşenleri arasında oluşan kimyasal reaksiyon olmakla birlikte zamana bağlı olarak gelişen çimentonun en önemli özelliklerinden biridir [8]. Betonun mekanik özelliklerinin belirlenmesi ve çevresel faktörlerden dolayı doğal kaynakların beton içerisinde kullanılması, ekonomik ve teknolojik avantajlar sağlamaktadır [9].

Uçucu kül kömürün yakılmasıyla oluşan en yaygın atık maddelerden biridir. Kömür yanmasından kaynaklanan gaz halindeki ürünlerden oluşan elektrostatik

separatörler (filtre) tarafından toplanan alüminosilikat cam, mullit ve kuvarstan oluşan daha küçük parçacıklardan oluşur. Uçucu külün bileşimi ağırlıklı olarak SiO_2 , Al_2O_3 ve Fe_2O_3 oksitler içerir. Bu oksitler genellikle puzolanik aktiviteye neden olan amorf formunda bulunurlar. Uçucu kül ve $\text{Ca}(\text{OH})_2$ parçası olan camsı yapıdan gelen Al ve Si oksitleri arasındaki reaksiyon sonucunda suda daha az çözünen kalsiyum alüminat hidratlı (CAH) ve kalsiyum silikat hidratlı (C-S-H) bileşenleri oluştururlar [10].

Uçucu kül portland çimentosu ve su ile karıştırıldığında, normal çimento hidratasyonu ile oluşan ürünlere benzer ürünler oluşur, ancak daha az geçirgen ve daha yoğun mikroyapı meydana getirir [11]. Uçucu kül ortam sıcaklıklarında çimento ürünü oluşturan puzolanlar olarak sınıflandırılır. Uçucu kül, kuvars, mullit, manyetit ve hematit gibi amorf ve kristal elementleri içerir [12]. Uçucu kül parçacıkları yüksek yüzey alanlı ve düşük kızdırma kayıplı küresel yapıya sahiptir. Ayrıca uçucu külün en çok çözünen fazının amorf silikat olduğu bilinmektedir [13]. Bazı puzolanik malzemeler betonda kullanıldığında arayüzleri güçlendirebileceği bilinmektedir. Saito ve Kawamura uçucu külün, CH kristallerinin oryantasyon derecesini belirgin olarak

düşürdüğünü ve arayüzeyde CH kristallerinin çökmesini ve etrenjit oluşumunu bastırıldığını göstermiştir [14]. Rong vd tarafından yapılan çalışmada çok sayıda uçucu kül parçacıklar hamur içine gömülerek gözenekleri doldurduğunu görmüştür. Uçucu kül kullanılarak elde edilen beton nispeten, uçucu kül içermeyen diğer betonlardan daha yoğun ve homojen olduğu bunun sonucunda ise daha yüksek mukavemete elde edilmesine neden olduğu tespit edilmiştir. Buna bağlı olarak CH miktarındaki azalma ve boşlukların dolması sebebiyle uçucu külün betonun mekanik özelliklerini geliştirdiği gözlemlenmiştir [15]. Uçucu kül içeren betonlar genellikle işlenebilirliği daha yüksek, hidratasyon ısıları daha düşük betonlardır. Bu betonların erken yaşlardaki basınç dayanımları uçucu kül içermeyen betonlara kıyasla daha düşük olmasına karşın ileriki yaşlardaki dayanımları neredeyse aynı hatta bazen daha yüksek seviyelere çıkabilmektedir. Bu tip betonların çevresel etmenler sebebiyle oluşabilecek bozulmalara karşıda daha dayanıklı betonlar olduğu bilinmektedir [16]. Beton karışıma uçucu kül eklemek sülfat saldırısının direncini de artırabilmektedir [17]. Kurt vd diğerleri tarafından yapılan çalışmada beton karışımlarındaki uçucu kül miktarındaki

artış, kendiliğinden yerleşen taze betonun işlenebilme özelliğini geliştirdiği görölmüştür. Bu özellik viskoziteyi fazla artırmadan betonun kayma gerilmesini azaltmıştır. Uçucu kül miktarındaki artış, uçucu külün düşük puzolanik aktivitesi nedeniyle suyun karışmasını geciktirmektedir. Bunun sonucu olarak, işlenebilirlik kaybı, genel olarak, kül ve su miktarı arttıķa azalmaktadır [18]. Uçucu külün beton içerisine katılması boşluklar arasında mikro dolgu ve puzolanik reaksiyon etkisi yapmaktadır. Puzolanik reaksiyon, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 'in uçucu kül içinde bulunan SiO_2 ve Al_2O_3 ile reaksiyonundan meydana gelmektedir. Bununla birlikte, uçucu külün puzolanik reaksiyonu, erken hidrasyon döneminde belirgin olmayı uçucu kül parçacıkları sadece boşluk dolgu maddesi gibi davranır [19].

Silis dumanı silisyum metali veya ferrosilisyum (FeSi) alaşımlarının üretimi sırasında kullanılan elektrik ark fırınlarında yüksek saflıktaki kuvarsitin kömür ve odun parçacıkları ile indirgenmesi sonucu elde edilen çok ince taneli tozudur. Fırınların düşük sıcaklıktaki üst bölümlerinde SiO gazı hava ile temas ederek hızla okside olur ve amorf SiO_2 olarak yoğunlaşarak silis dumanını oluşturur [20]. Silis dumanı yüksek mukavemetli beton üretiminde kullanılmakta birlikte, çimento miktarını

azaltarak ekonomi sağlamaktadır. Ayrıca hem taze betonda hem de sertleşmiş betonda betonun özelliklerini iyileştirmektedir. Bu nedenle silis dumanının uçucu kül ile birlikte kullanımı ilginç bir alternatif oluşturmaktadır. Son zamanlarda iki ürünün kombinasyonu kullanılarak çok sayıda araştırma yapılmıştır [21]. Silis dumanı tipik olarak, mukavemet ve dayanıklılığı arttırmak için yüksek performanslı betonda % 5 -% 10'luk ikame seviyelerinde kullanılır. Silis dumanı ayrıca, kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) üretmek için kalsiyum hidroksit ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ile reaksiyona girmekle kalmaz aynı zamanda ince tanecik boyutuna bağlı olarak çimento hamurunun mikro yapısını da değiştirir [7]. Silis dumanı ile %20'lik bir çimentonun değiştirilmesi ve harca süper akışkanlaştırıcı ilave edilmesi, düz çimento harcı ile karşılaştırıldığında daha ince bir ara yüzey bölgesi oluşturur. Bu durum, silis dumanının bir dolgu maddesi olarak hareket ederek ve ikincil hidrasyon, çimento ve silika dumanı partikülleri sağlayarak mikroyapıyı yoğunlaştırması ve daha iyi bir paketleme yapılabilmesi için karışıma fazladan akış kabiliyeti sağlaması nedeniyle oluşur. % 20'lik bir silis dumanının çimento ile değiştirilmesi silindirik agregalar ve harç matrisleri arasındaki ara yüzey bölgesinde silisyum

dioksit (SiO_2) miktarını önemli ölçüde arttırmıştır [5].

Silis dumanı ve uçucu külün birlikte beton içerisinde kullanılması açık bazı sinerjistik etkilerle sonuçlanmaktadır. Silis dumanı, uçucu küllü betonun düşük erken mukavemetini iyileştirmekte, uçucu kül silis dumanı betonunun uzun vadeli mukavemetini artırmaktadır. Uçucu kül silis dumanının su ihtiyacını artırmaktadır. Silis dumanı, sülfat direnci ve ASR'nin önlenmesi için gerekli olan yüksek seviyelerde yüksek CaO uçucu külünü azaltır [22]. Silis dumanı katkısı diğer puzolanlar gibi ilave C-S-H jelleri oluşmasını sağlamaları yanı sıra ince silis dumanı taneleri agrega-hamur ara yüzey bölgesini doldurarak beton dayanımını arttırlar [23]. Silis dumanı taze betona ilave edildiğinde ilave CSH üretmek için kimyasal olarak CH ile reaksiyona girer. Bu reaksiyona bağılı olarak betonun basınç dayanımı ve kimyasal direnci artmaktadır. Bunu sebebi silis dumanı hidrate çimento hamurunun boşluklarını doldurarak daha yoğun bir yapı oluşturmasıdır. Silis dumanının eklenmesi çimento hidratasyon oranını artırır ve ilk birkaç saat içinde C_3S ve C_3A hidratasyonunu hızlandırır [24]. Mikroyapı çalışmaları, silis dumanı içeren harçlarda, boşlukların azalması silis dumanının kum tanelerinin etrafında

oluşan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ile reaksiyona girmesi olduğunu göstermiştir. Betona silis dumanı katılmasıyla basınç dayanımı artmakta, rötre azalmakta, aşınma direnci artmakta, aderans artmakta, permabilite ise azalmaktadır [25].

Portland çimentosunun yerine uçucu kül veya silis dumanı kullanmanın yararları oldukça iyi bilinmektedir. Bununla birlikte, her iki malzeme de bazı eksikliklere sahip olmakla bütün sorunların çözümünde yeterli olduğu söylenemez. Silis dumanının beton içerisinde kullanılması mukavemet ve kimyasal dirence önemli katkıda bulunurken, su ihtiyacınca artış, betonda plastik büzülme ve ham halde işlenebilme zorlukları oluşturabilir [22]. Uçucu kül ve silis dumanı, birbirlerini tamamlayıcı olarak, ek C-S-H oluşturmak üzere $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ile reaksiyona girerek, gözenek yapısını iyileştirme, geçirgenliği azaltma, yoğunluğu artırma şeklinde etki ederek betonun dış etkilere karşı dayanıklılığını artırır [26].

Beton içerisinde çimento yerine uçucu kül ve silis dumanının birlikte kullanılması etkileri konusunda çok az bilgi bilinmektedir. Bu çalışmada uçucu kül ve silis dumanının birlikte kullanılmasının taze ve sertleşmiş betonun özellikleri üzerine etkisi ve silis dumanı

uçucu kül reaksiyon mekanizmasının gelişimi konusu araştırılmıştır. Beton içerisine çimento yerine belirli oranda uçucu kül katılması ilerleyen yaşlarda, silis dumanının erken yaşlarda, ikili kombinasyon ise silis dumanında olduğu gibi erken yaşlarda basınç mukavemetini artırdığından dolayı potansiyel olarak yararlıdır. Çalışmada, uçucu kül, silis dumanı ve uçucu kül+silis dumanını içeren betonların hidrasyon sürecinin yaş ve karışım oranına göre değişimi araştırılmıştır. Silis dumanı, uçucu kül ve bunların ikili kombinasyonu kullanılarak üretilen betonun mekanik ve fiziksel özelliklerinden elde edilen sonuçlar X-ışını kırınımı (XRD) tekniğinden elde edilen veriler ile karşılaştırılmıştır.

Materyal ve Metot

X-ışını mikro analizi, element dağılımının haritalarının yanı sıra niceliksel nokta kimyasal analizi sağlar. [28]. Betonun oluşturan ve bağlayıcılık özelliği kazandıran çimentonun hidrasyon sürecinde oluşan reaksiyonlar, X ışını kırınımı (XRD) ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) yöntemleri ile incelemek araştırmacılar için büyük ilgi görmüştür [29]. XRD kırınım yöntemi, üretilen numunelerin kristal yapıların belirlenmesi, faz kantitatif ve kalitatif analizi, faz dönüşümlerinin incelenmesi,

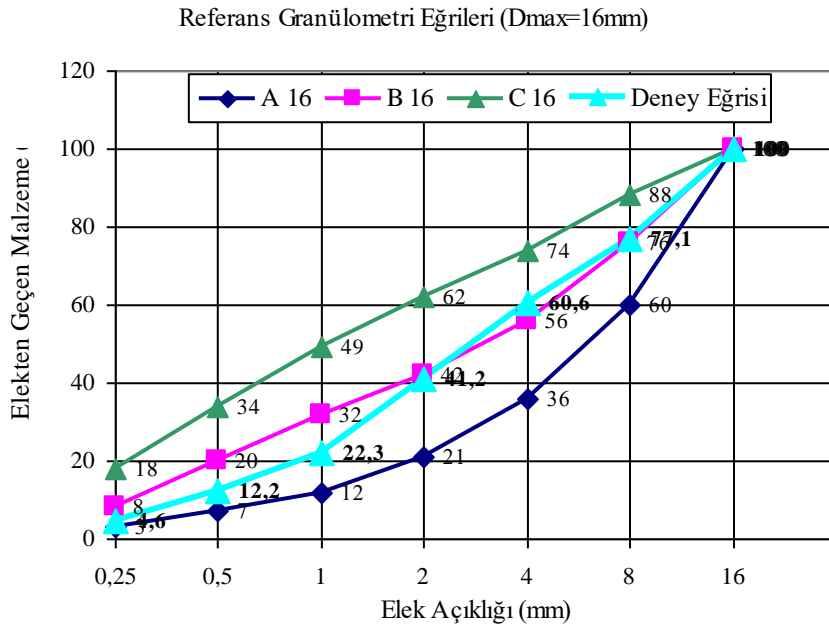
kristalografik dokunun çalışılması, kristallerin boyutlarının çalışmaların yapılmasına olanak sağlamaktadır [30]. Bu çalışmada aynı numuneler üzerinde XRD analizi yapılmış ve sonuçlar bu doğrultuda yorumlanmıştır.

Çalışmada Votorantim Hasanoğlan fabrikasında üretilmiş olan Portland çimentosu (CEM I 42.5) kullanılmıştır. Deneyde kullanılan uçucu kül (UK) Ares Çimento fabrikasının Seyitömer tesislerinde üretmiş olduğu külden, silis dumanı (SD) Mısırdaki ferrokrom tesislerinde üretilen ve Türkiye’de satışının yapıldığı Aryum Makine Kimya firmasından temin edilmiştir. Uçucu külün kimyasal bileşimi olarak SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 toplamı % 87,7 olup ASTM C618’de öngörülen uçucu kül koşullarını sağlamaktadır. Uçucu külünün kimyasal analizi ve fiziksel özellikleri Tablo 1’de verilmiştir.

Agrega granülometrisinin betonun bütün özellikleri üzerinde büyük etkisi olduğundan, bu çalışmada standardize edilmiş tek tip granülometri kullanılmıştır. Betonun oluşturan agregaların tane dağılımı en büyük tane büyüklüğüne bağlı olarak TS 802-2009’da belirtilen ideal bölgeye düşecek şekilde seçilmiştir. Bu araştırma da kullanılan agregalar elek açıklığı 2, 4, 8 ve 16 mm olan eleklerden elenmiştir.

Deneylerde kullanılan agreganın maksimum tane çapı 16 mm'dir. İnce agrega için 0–2 ve 2–4, iri agrega için ise 4–8 ve 8–16'lık tane sınıfları oluşturulmuştur. İri agreganın %60'ü 8–16 mm, %40'ı ise 4–8 mm arasındaki

agregalardan alınmıştır. İnce agreganın %34'ü 2–4 mm, %66'sı ise 0–2 mm arasında olacak şekilde granulometri ayarlanmıştır (Şekil 1). Çalışmada üretilen beton numunelerinde su / bağlayıcı oranı 0,60 seçilmiş ve sabit olarak alınmıştır.



Şekil 1. Granulometri Eğrisi (TS 802-2009 Standart Eğriler ve Deney Eğrisi)

Tablo 1. Çalışmada kullanılan çimento, silis dumanı ve uçucu külün kimyasal birleşimi

Kimyasal birleşim			
Oksit	Çimento (%)	Uçucu kül (%)	Silis dumanı (%)
SiO ₂	19,43	56,80	93,65
Al ₂ O ₃	5,31	24,10	0,28
Fe ₂ O ₃	3,79	6,80	0,58
CaO	64,39	1,40	0,28
MgO	2,25	2,40	0,25
K ₂ O	0,90	-	0,87
Na ₂ O	0,09	-	-
SO ₃	2,47	2,90	0,38
Yanma kaybı	1,07	0,80	-

Beton numunelerinin kristal yapısını belirlemek için analitik XRD tekniği kullanıldı. Ayrıca uçucu kül, silis dumanı, ikili kombinasyonunu içeren numuneler ve kontrol numunesi çimento hamuru ve beton oluşturmak için çeşitli karışım oranları kullanılmıştır. Numuneler içerisindeki çimento, ağırlık bazında % 5, % 10, % 15 ve % 20 oranlarında uçucu kül, silis dumanı ve uçucu kül + silis dumanı ile değiştirilmiştir. Bu çalışma için on üç farklı beton numunesi (KN, UK5, UK10, UK15, UK20, SD5, SD10, SD15, SD20, SDUK5, SDUK10, SDUK15 ve SDUK20) hazırlanmıştır.

Üretilecek olan numuneleri karıştırmak için bir döner mikser kullanılmıştır. Karışımları hazırlanan malzemeler su ilave edilmeden önce mikser ile karıştırılmıştır. Daha sonra su

ilave edilerek karışım homojen hale gelinceye (3 dakika) mikserde karıştırılmıştır. Elde edilen karışımlar $150 \times 150 \times 150$ mm ölçüsünde yağlanmış çelik küp kalıplar içerisine konularak şişlenmek sureti ile sıkıştırılmıştır. Kalıp içerisindeki numuneler 24 saat bekletildikten sonra kalıplardan çıkarılarak 20 ± 2 ° C 'lik sabit bir sıcaklıktaki kür havuzuna konularak 7, 28 ve 90 günlük yaşlar için kür edilmiştir.

Karışımların her bir yaşı için üçer adet olmak üzere toplam dokuz adet numune hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler 7, 28 ve 90 günlük yaşlarda basınç dayanım testine tabii tutulmuştur. Kırım sonrası her karışımdan XRD mikroyapı analizini için numuneler alınmıştır. Hazırlanan numuneler için karışım oranları Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. $1 m^3$ için karışım oranları

Seri Adı	Su/ Bağlayıcı	Çimento (kg)	Su (kg)	Agrega (kg)				UK (kg)	SD (kg)
				0-2 mm	2-4 mm	4-8 mm	8-16 mm		
KN	0,60	350,00	210,00	689,00	350,00	280,00	420,00	0,00	0,00
SD5	0,60	332,50	210,00	682,00	350,00	280,00	420,00	0,00	17,50
SD10	0,60	315,00	210,00	676,00	350,00	280,00	420,00	0,00	35,00
SD15	0,60	297,50	210,00	670,00	350,00	280,00	420,00	0,00	52,50
SD20	0,60	280,00	210,00	664,00	350,00	280,00	420,00	0,00	70,00
UK5	0,60	332,50	210,00	671,00	350,00	280,00	420,00	17,50	0,00
UK10	0,60	315,00	210,00	674,00	350,00	280,00	420,00	35,00	0,00
UK15	0,60	297,50	210,00	666,00	350,00	280,00	420,00	52,50	0,00

UK20	0,60	280,00	210,00	659,00	350,00	280,00	420,00	70,00	0,00
SDUK5	0,60	332,50	210,00	681,00	350,00	280,00	420,00	8,75	8,75
SDUK10	0,60	315,00	210,00	675,00	350,00	280,00	420,00	17,50	17,50
SDUK15	0,60	297,50	210,00	668,00	350,00	280,00	420,00	26,25	26,25
SDUK20	0,60	280,00	210,00	661,00	350,00	280,00	420,00	35,00	35,00

Araştırma Bulguları

Basınç dayanımı bulguları

Şekil 1’de 7, 28 ve 90 günlük betonların basınç dayanımı verilmiştir. Uçucu kül, silis dumanı ve bunların ikili kombinasyonunun 7, 28 ve 90 günlük betonun basınç dayanımına etkisini gösterilmiştir. Çimento yerine bağlayıcı

olarak uçucu külün kullanılması betonun basınç dayanımına etkisi, ileriki yaşlarda kontrol numunesine göre daha iyi sonuç verdiği, silis dumanı ve ikili kombinasyonların ise bütün yaşlarda kontrol numunesine göre daha iyi dayanım verdiği sonuçlardan görülmektedir.

Tablo 3. Karışımlara ait 7, 28 ve 90 günlük basınç

No	Beton Tipi	Basınç Dayanımı MPa (7 gün)	Basınç Dayanımı MPa (28 gün)	Basınç Dayanımı MPa (90 gün)
1	KN	32.49	38.34	40.28
2	SD5	32.52	41.71	42.43
3	SD10	33.62	42.10	43.28
4	SD15	34.42	43.13	44.59
5	SD20	33.70	41.41	43.37
6	UK5	31.28	39.62	40.59
7	UK10	30.48	40.69	41.95
8	UK15	29.28	40.05	41.56
9	UK20	29.07	38.91	40.33
10	SDUK5	31.80	40.36	41.56
11	SDUK10	32.80	41.24	41.69
12	SDUK15	33.58	42.84	42.82
13	SDUK20	31.90	40.60	41.83

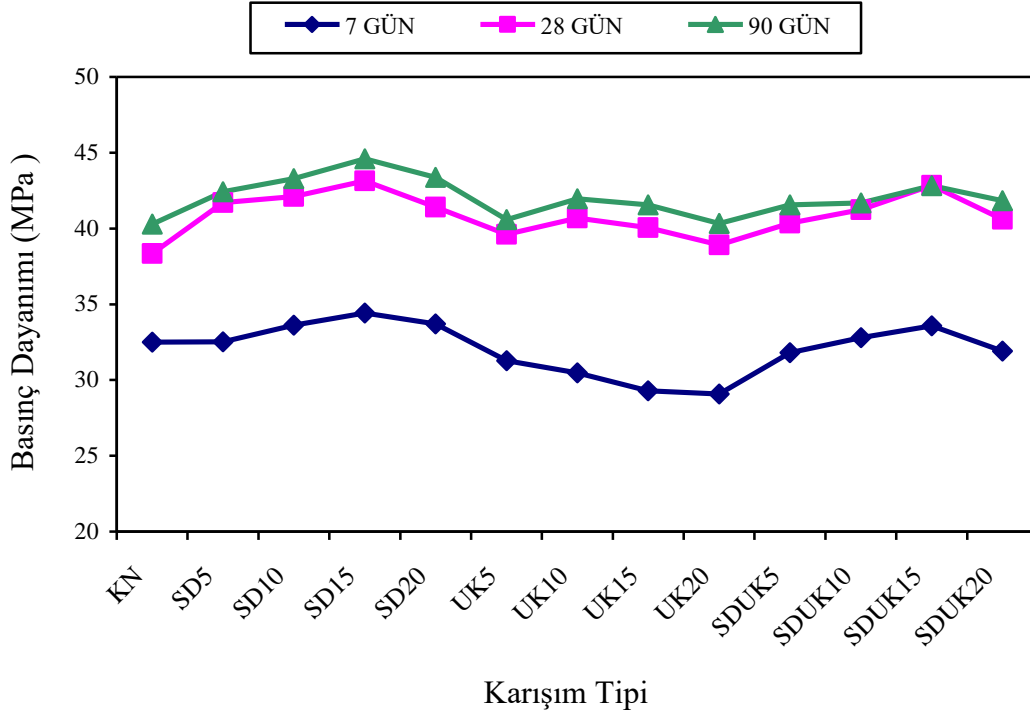
Şekil 2, uçucu kül, silis dumanı ve SD+UK içeren karışımların basınç mukavemetinin kontrol numunesine kıyaslaması gösterilmektedir. Şekilden, uçucu kül içeren betonların basınç dayanımının, 7 günlük kürden sonra kontrol numunesinden daha düşük olduğu, silis dumanı ve SD+UK içeren betonların basınç dayanımının ise kontrol numunesinden büyük olduğu gözlemlenmiştir. UK içeren betonlarda 7 günlük kür sonrasında, UK5 en yüksek basınç mukavemetine sahipken, UK20 en düşük basınç mukavemetine sahiptir. Uçucu kül oranı arttıkça basınç dayanımının azaldığı tespit edilmiştir. Bu eğilim 7 günlük yaşta doğrusal olarak UK oranı arttıkça devam etmiştir. SD içeren ve SD+UK'nın birlikte kullanıldığı numenlerde ise SD15 ve UK15 en yüksek basınç mukavemetine sahipken, SD5 ve UK5 ise en düşük basınç mukavemetine sahiptir. Silis dumanı oranı arttıkça basınç dayanımının arttığı tespit edilmiştir.

28 günlük kür sonrasında değişik oranlarda uçucu kül, silis dumanı ve SD+UK içeren karışımların basınç mukavemetinin kontrol numunesinden yüksek olduğu görülmüştür. UK içeren betonlarda 28 günlük kür sonrasında, UK10 en yüksek basınç mukavemetine

sahipken, UK20 en düşük basınç mukavemetine sahip ve neredeyse KN ile aynı basınç dayanımını göstermiştir. SD içeren betonlarda 28 günlük kür sonrasında, SD15 en yüksek basınç mukavemetine sahipken, SD20 en düşük basınç mukavemetine sahip ve neredeyse KN ile aynı basınç dayanımını göstermiştir. SD+UK içeren betonlarda 28 günlük kür sonrasında, SDUK15 en yüksek basınç mukavemetine sahipken, SDUK5 en düşük basınç mukavemetine sergilemiştir.

90 günlük kür sonrasında basınç dayanımının gelişimi 28 günlük yaşta benzer şekilde gerçekleşmiştir. Farklı oranlarda uçucu kül, silis dumanı ve SD+UK içeren karışımların basınç mukavemetinin kontrol numunesinden yüksek olduğu görülmüştür. UK içeren betonlarda 90 günlük kür sonrasında, UK10 en yüksek basınç mukavemetine sahipken, UK20 en düşük basınç mukavemetine göstermiştir. SD içeren betonlarda 90 günlük kür sonrasında, SD15 en yüksek basınç mukavemetine sahipken, SD5 en düşük basınç mukavemetine sahip ve neredeyse KN ile aynı basınç dayanımını göstermiştir. SD+UK içeren betonlarda 28 günlük kür sonrasında, SDUK15 en yüksek basınç mukavemetine

sahipken, SDUK5 en düşük basınç mukavemetine sergilemiştir.



Şekil 2. 7,28 ve 90 günlük yaşlardaki karışımların kontrol numunesi ile karşılaştırılması

Şekil 2'deki sonuçlar incelendiğinde kür sonrasında 7 günlük yaşta tüm oranlarda basınç dayanımı azalırken 28 ve 90 günlük yaşlarda tüm karışımlar için betondaki uçucu kül içeriğini arttırmak basınç dayanımı da arttırdığını göstermektedir. Bunun sebebi uçucu kül içinde bulunan oksitler ile Ca(OH)_2 arasındaki puzolanik reaksiyonda artışa neden olmasıdır. Chindaprasirt ve Rukzon 90 günlük katkısız betona kıyasla uçucu kül içeren betonun daha iyi bir performans sergilediğini tespit etmiştir. Memon vd.

mineral katkı maddelerinin ve kimyasal katkıların betonda basınç direnci, gözeneklilik ve gözenek boyutu dağılımı üzerine etkilerini olumlu etki yaptığını gözlemlemiştir [27]. Yapılan çalışmadan elde edilen veriler de bu sonuçları desteklemektedir. Yapılan çalışmalarda uçucu külden kaynaklanan dayanım kaybını engellemek için uçucu kül ile birlikte çimento içerisine belli oranda aktive edilmiş karbonun eklenmesinin olumlu sonuç verdiği görülmüştür. 7, 28 ve 90 günlük yaşa bağlı olarak, SD oranı arttıkça basınç dayanımlarının arttığı,

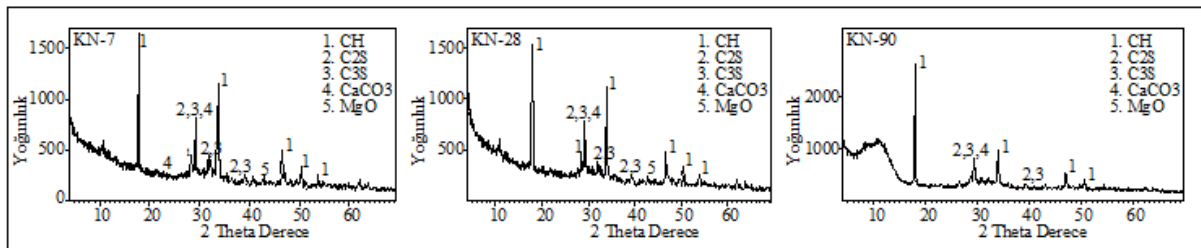
çimento yerine %15 oranında silis dumanı kullanıldığında maksimum basınç dayanım elde edildiği görülmektedir. Silis dumanı ve uçucu külün birlikte kullanılması durumunda ise silis dumanı içeren betonlara benzer bir etki görülmüştür ve her yaşta en yüksek dayanım %15 oranından silis dumanı ve uçucu kül içeren SDUK15 betonundan elde edilmiştir. Silis dumanı ve uçucu külün (SDUK) birlikte kullanılması durumunda beton basınç dayanımının silis dumanlı karışımlardan düşük ancak uçucu küllü karışımlardan yüksek olduğu görülmektedir. SDUK15 karışımının ise kontrol numunesine yakın basınç değerine sahip olduğu görülmektedir.

XRD bulguları

Bu çalışmada aynı numuneler üzerinde XRD analizi yapılmış ve sonuçlar bu doğrultuda yorumlanmıştır.

Uçucu küllerin doğru kullanılması betonun mekanik özelliklerini geliştirdiği görülmüştür. Uçucu kül, portland çimentosunun hidrasyon ürünlerinden olan Ca(OH)_2 ile reaksiyona girerek puzolanik özellikler gösterir. Bu puzolanik reaksiyondan kalsiyum-silikat-hidrat (C-S-H) ve kalsiyum alüminat silikat hidrat ürünleri (C-A-S-H) oluşur. Kontrol numunesi ile birlikte üretilen beş farklı karışım numunesi (KN, UK5, UK10, UK15 ve UK20) için XRD analizi yapılmış ve sonuçlar Şekil 3-17'de verilmiştir.

Çalışma kapsamında üretilen numunelere ait XRD analizleri MTA Genel Müdürlüğü Mineraloji-Petrografi Araştırmaları Birimi'nde bulunan Cu X-ışın Tüplü Panalytical X'Pert Powder marka model cihazlar kullanılarak yapılmıştır.



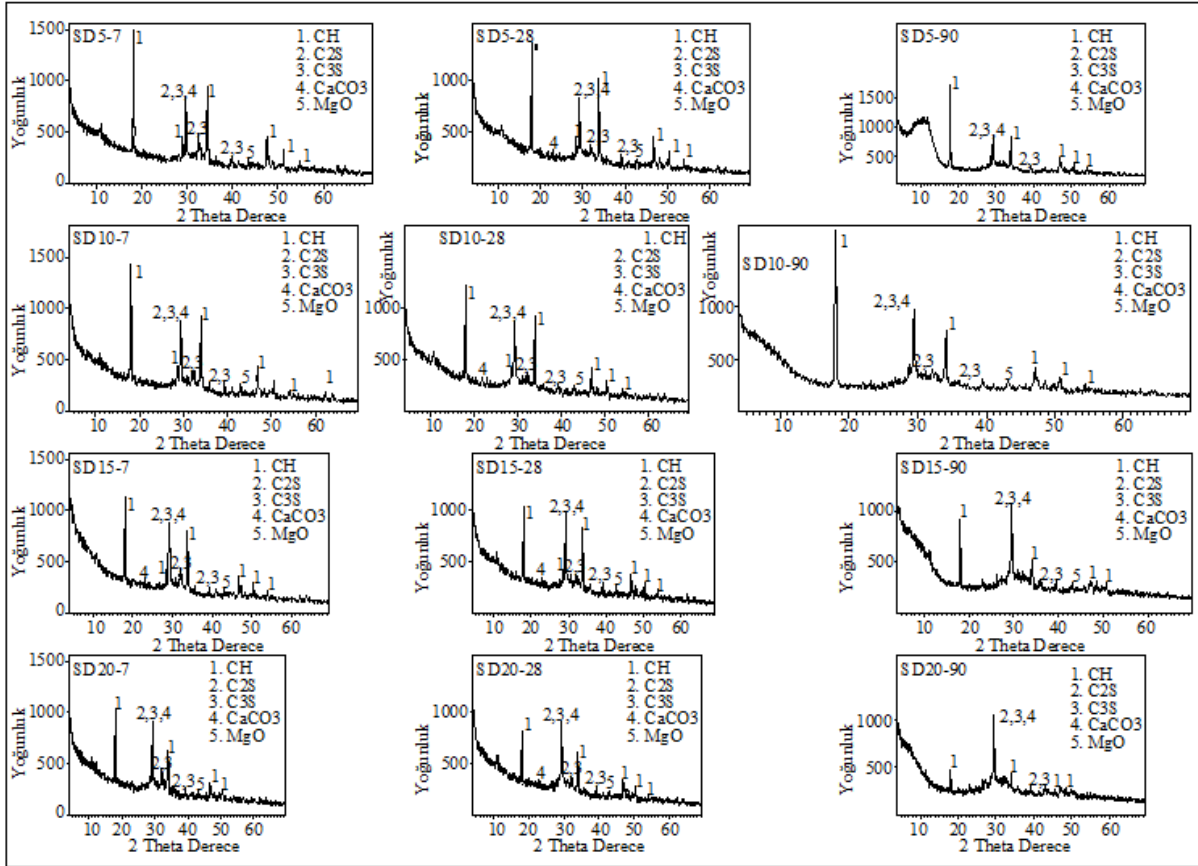
Şekil 3. KN numunesi XRD analizi (7,28 ve 90 gün)

Kontrol numunesinin 7, 28 ve 90 günlük yaşlardaki XRD analizleri incelendiğinde CH yoğunluğu en düşük 28

günlük yaşta oluşmuştur. C_2S ve C_3S miktarının artarak CH ile bileşmesi sonucunda ise C-S-H yoğunluğu yaşa bağlı

olarak artmıştır. 90 günlük yaşta en fazla

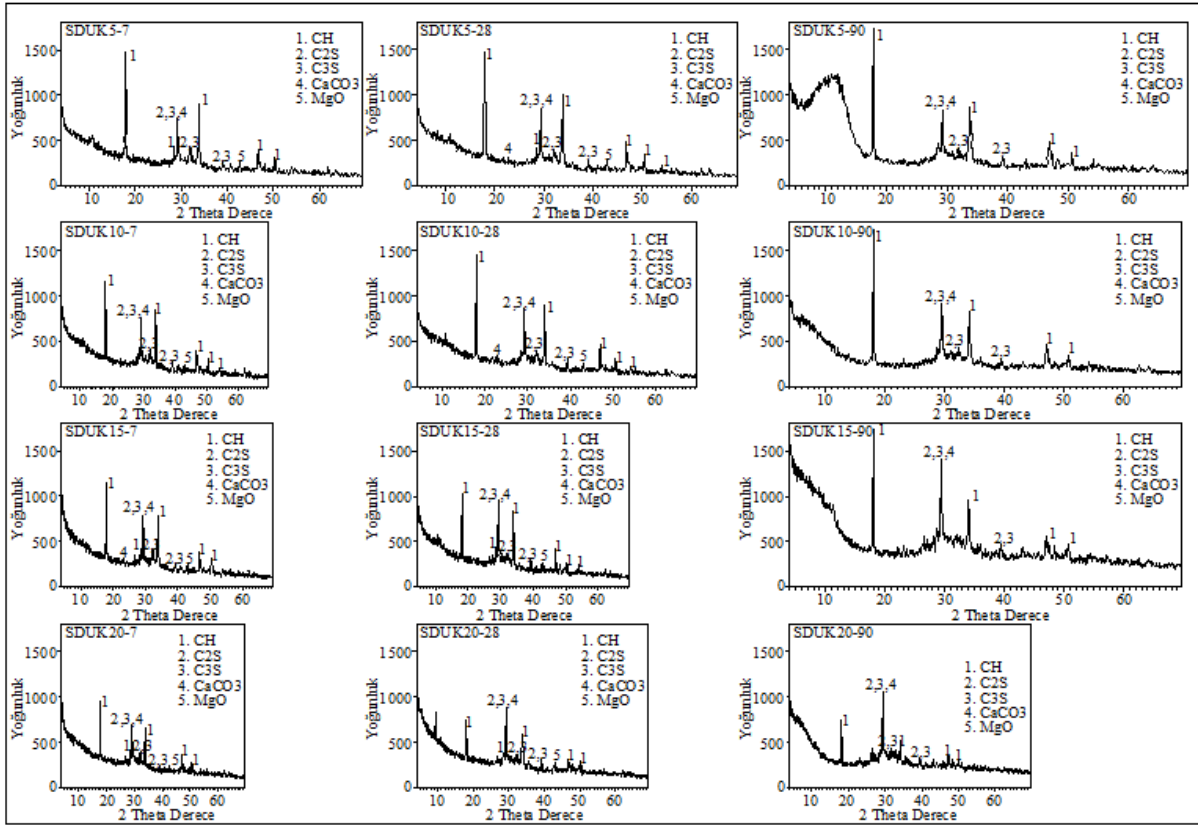
C-S-H oluşumu gerçekleşmiştir.



Şekil 4. SD numunesi XRD analizi (7, 28 ve 90 gün)

Silis dumanı içeren numunelerin 7, 28 ve 90 günlük yaşlardaki XRD analizleri incelendiğinde, tüm yaşlarda CH yoğunluğu en düşük SD20 numunesinde olmuştur. C-S-H yoğunluğu ise en yüksek

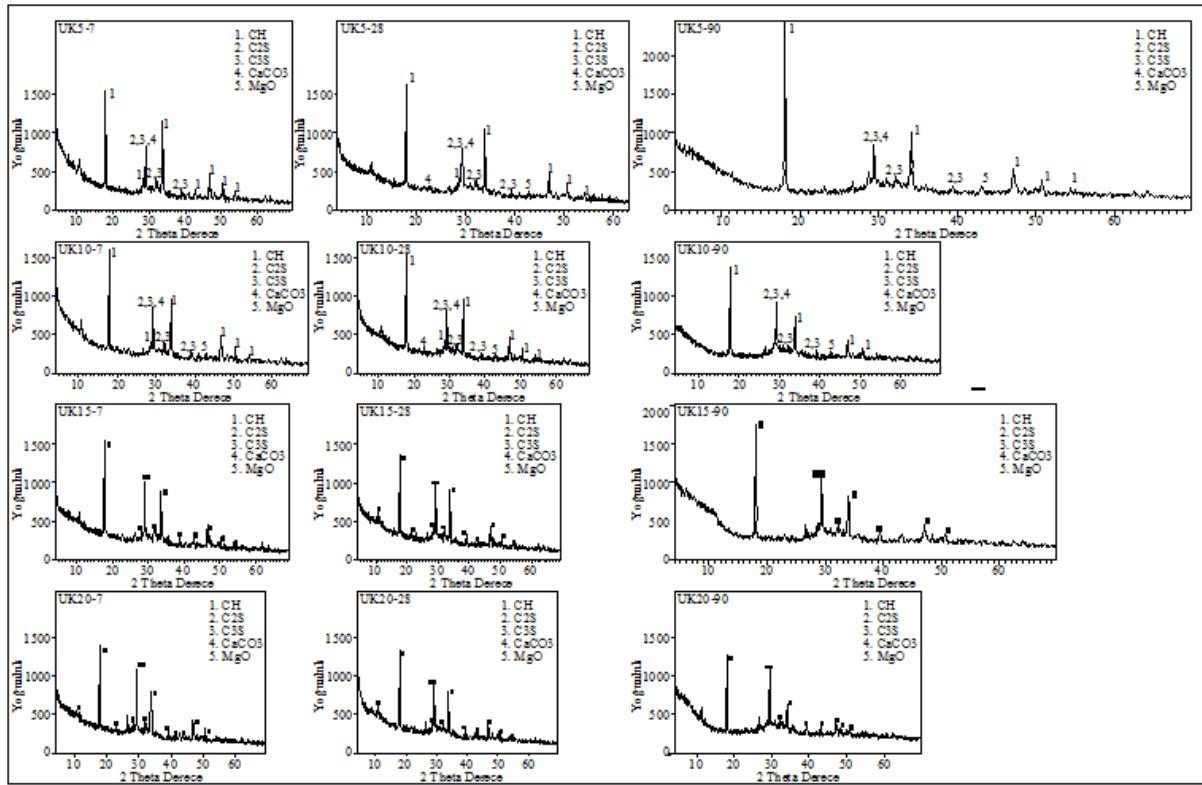
SD20 numunesinde meydana gelmiştir. XRD analizleri incelendiğinde yaş ve katılan silis dumanı oranı arttıkça CH yoğunluğunda azalma, C-S-H miktarında ise artma meydana gelmiştir.



Şekil 5. SDUK numunesi XRD analizi (7, 28 ve 90 gün)

Silis dumanı + uçucu kül içeren numunelerin 7, 28 ve 90 günlük yaşlardaki XRD analizleri incelendiğinde, tüm yaşlarda CH yoğunluğu en düşük SDUK20 numunesinde olmuştur. C-S-H yoğunluğu ise 7 günlük yaşta en yüksek SDUK20 numunesinde olmasına rağmen KN numunesinden daha düşük olmuştur. 28

günlük yaşta en yüksek SDUK15 numeninden, 90 günlük yaşta ise SDUK20 numunesinde oluşmuştur. XRD analizleri incelendiğinde ilerleyen yaşlarda katılan silis dumanı + uçucu kül oranı arttıkça CH yoğunluğunda azalma, C-S-H miktarında ise artma meydana gelmiştir.

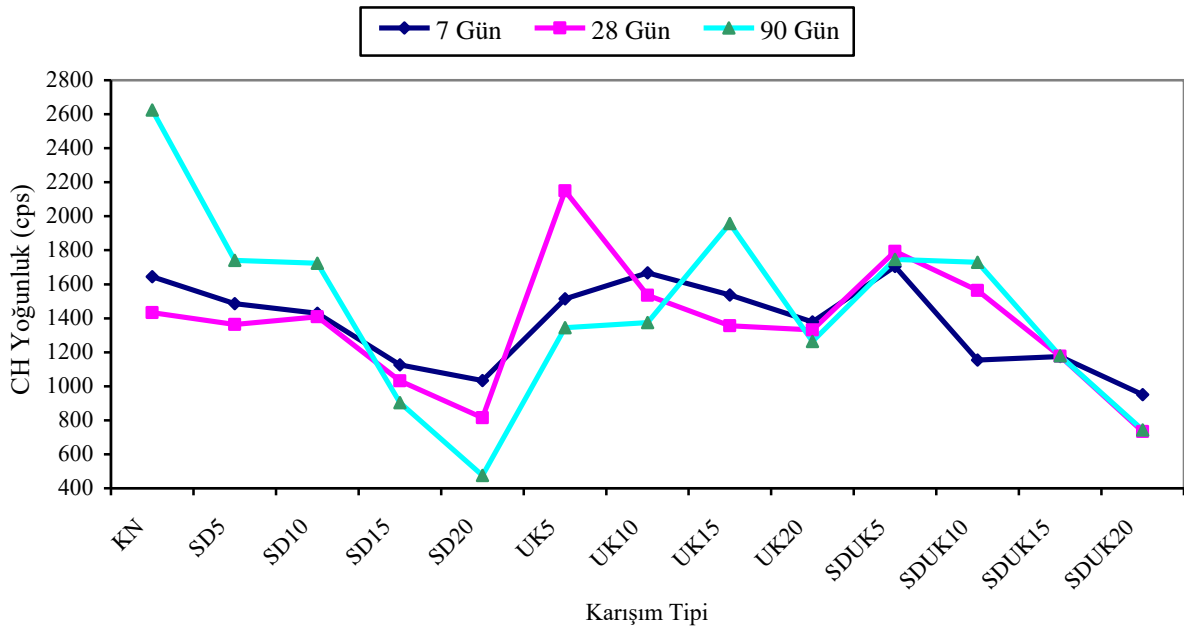


Şekil 6. UK numunesi XRD analizi (7, 28 ve 90 gün)

Uçucu kül içeren numunelerin 7, 28 ve 90 günlük yaşlardaki XRD analizleri incelendiğinde, tüm yaşlarda CH yoğunluğu en düşük UK20 numunesinde olmuştur. C-S-H yoğunluğu ise 7 ve 28 günlük yaşta UK15, 90 günlük yaşta ise UK20 numunesinde meydana gelmiştir. XRD analizleri incelendiğinde yaş ve katılan silis dumanı oranı arttıkça CH yoğunluğunda azalma, C-S-H miktarında ise artma meydana gelmiştir.

Genel olarak hidrate olmuş çimento hamuru, hidrasyon ürünleri olan

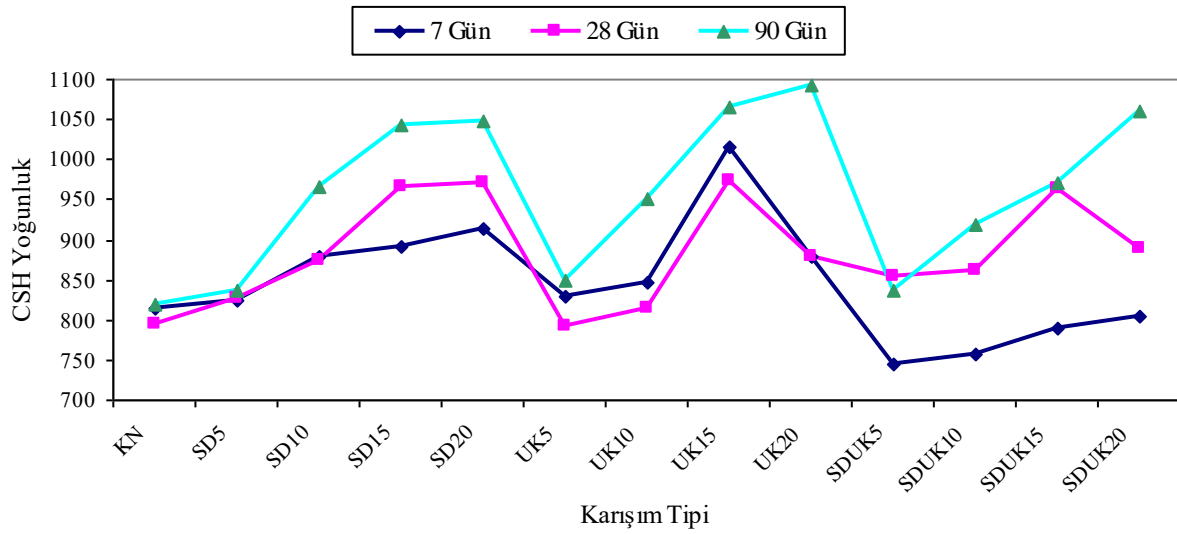
portlandit (CH), kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) ve etrenjit ile birlikte hidrate olmamış klinker minerallerini içermektedir. Uçucu kül, silis dumanı ve silis dumanı + uçucu kül içeren çimento hamuru, herhangi bir katkı içermeyen çimento hamuruna göre tüm hidrasyon yaşlarında farklı oranlarda CH oluşturmuştur. Bu durum bütün hamurlardaki hidrasyon gelişiminin farklı oranlarda gerçekleştiğini göstermektedir. Mineral katkıların katılması oluşan CH miktarını tüm yaşlarda, portland çimentosu hamuruna göre azalttığı görülmektedir.



Şekil 7. SD ve UK'nın CH yoğunluğuna etkisi

X-ışını kırınımı metodu, betonun 7, 28 ve 90 günlük yaşlarda çimento hidrasyonuna bağılı olarak meydana gelen ürünlerin farklı miktarlarda oluştuğunu göstermiştir. İncelenen yaşlarda, kullanılan yöntem hidrasyon ürünlerinin (portlandit ve etrenjit) yanı sıra zamanla hidrasyon ürünlerinin artış ve gelişimine katkı sağlayacak diğ er mineral bileşiklerin varlığını ortaya koymuştur.

Silis dumanı, uçucu kül ve bunların ikili olarak kullanılması oluşan Ca(OH)_2 miktarında belirgin bir şekilde azalma meydana getirirken, C-S-H oluşumunda ise artış meydana getirdiği gözlenmiştir. Şekil 3-6 incelendiğinde numunelerin 7, 28 ve 90 günlük kür sonrasında XRD analizindeki pik noktalarından görüleceği gibi CH piklerinin SD, UK ve SD+UK kullanılması ile düştüğü tespit edilmiştir.



Şekil 8. SD ve UK'nın C-S-H yoğunluğuna etkisi

Beton içerisine çimento yerine uçucu kül ikame edilmesiyle hidrasyon sonucu oluşan CH oluşumu azalmıştır. Ancak KN numunesine göre 7 günlük yaşta daha düşük bir basınç dayanımı elde edilmiştir. İlerleyen yaşlarda (28 ve 90 gün) puzolanik bir yapıya sahip olan uçucu kül içeride bulunan oksitler zamanla CH'ye bağlanarak, yeni bir puzolanik ürün olan C-S-H jelini üretmiş ve böylece mukavemet değerlerinin KN numunesine ulaşmasına hatta geçmesine sebep olduğu düşünülmektedir.

Ma ve Brown uçucu külün hidrasyon reaksiyonları araştırmış ve XRD analizi sırasında kalsiyum silikat hidrat, trikalsiyum alüminat hidrat ve etrenjit gözlenmiştir. Reaktiflikteki değişimlerin, eklenen Ca(OH)_2 veya $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ varlığına bağlı olduğu görülmüştür. Goni vd uçucu külün

puzolanik reaksiyonu ve oluşan bileşikten etkisini araştırmış ve alkalilerin, hidrasyon koşullarındaki reaktivitesinde uçucu kül hassasiyetinden daha önemli rol oynadığını göstermektedir [31]. Bu çalışmada da buna benzer sonuçlar elde edilmiştir.

Dorum vd. yaptığı çalışmada uçucu kül içeren hidrate olmuş çimento hamuru hidrasyon ürünleri olan portlandit, kalsiyum silikat hidrat ve etrenjit ile birlikte hidrate olmamış klinker mineralleri aynı anda bulunduğunu gözlemlemiştir. Uçucu kül içeren hamurun, içermeyen hamura göre tüm hidrasyon günlerinde farklı oranlarda CH oluşturduğu ve tüm yaşlarda Uçucu kül içeren hamurun CH miktarının, içermeyen hamura göre daha az olduğu görülmüştür. Bu durum hamurdaki hidrasyon gelişiminin farklı oranlarda gerçekleştiğini göstermektedir

[32]. Yapılan çalışmadan elde edilen sonuçlar yapılan bu çalışma ile örtüşmektedir.

Silis dumanı içeren numuneler incelendiğinde portlandit fazını karakterize eden tüm pikler tamamen kaybolur. Çimento hidratasyonu sırasında açığa çıkan kalsiyum hidroksit, C-S-H fazlarını oluşturmak için aktif silis dumanı ile etkileşimin bir sonucu olarak tüketilmektedir. Şekil 3-6'dan görüleceği üzere silis dumanı içeren numuneler artan silis dumanına karşılık oluşan CH miktarının azaldığını göstermiştir. Bu sonuçlar Saad tarafından elde edilen sonuçlar ile örtüşmektedir.

Sonuç

Uçucu kül ve silis dumanı bünyesinde yüksek miktarda silikanın varlığı nedeniyle, beton içerisine belli oranlarda katıldığında betona yüksek mukavemet ve dayanıklılık kazandıran puzolanik özellikteki malzemelerdir. Bu sebeple uçucu kül ve silis dumanının tekli veya ikili karışımının çimento ve beton içinde kullanılması, araştırmacılar için halen üzerinde çalışılacak bir konu olmaya devam etmektedir.

Uçucu kül, silis dumanı ve bunların ikili kombinasyonu çimento yerine kullanılması ile numunelerindeki portlandit

(Ca(OH)₂) yüzdesi genel olarak azalmış ve C-S-H oranı artmıştır. Şekil 2'de görüldüğü gibi betona uçucu kül eklenmesi 7 günlük dayanımı olumsuz etkilerken, 28 ve 90 günlerde ise basınç dayanımı artırdığı gözlemlenmiştir. Silis dumanı ve SD+UK kullanılması bütün yaşlarda basınç dayanımını artırmıştır. Uçucu kül ve silis dumanı agrega-çimento ara yüz bölgesini yoğunlaştırarak betondaki çimento hamurunun mikro yapısını geliştirdiği gösterilmiştir. SD ve UK kullanılması ilerleyen yaşlarda hem betonun mekanik özelliklerini hem de dayanıklılığını geliştirdiği bilinmektedir.

Tüm yaşlarda, portland çimentosunun kimyasal reaksiyon süresi boyunca, silikatlar serbest Ca(OH)₂ ile tepkimeye girerek amorf yapıdaki C-S-H jelini oluşturmuştur. Bu nedenle dayanım açısından ve betonun durabilitesi için zararlı olan Ca(OH)₂ miktarı kullanılan mineral katkılara bağlı olarak azalmıştır. Şekil 7'de görüleceği üzere uçucu eklenmesi 90 günlük yaşta CH yoğunluğunu %51,70, silis dumanı kullanılmasında %81,91 ve silis dumanı+uçucu kül kullanılmasında ise %71,55 oranında azalma olmuştur. Beton içerisine mineral katkı eklenmesi ile kimyasal etkileşim sonucu çimento hidratasyonunda elde edilen Ca(OH)₂

tüketimine yol açmıştır. Kür edilmiş numunelerin XRD görülen portlandit pikleri ileleyen yaşlarda devam eden hidrasyon sonrasında mineral katkıları ile birlikte bazalmıştır. Oluşan portlanditler, çimento hidrasyonu sonucu oluşmuş C_3S ve C_2S 'in uçucu kül ve silis dumanı ile birleşerek C-S-H'yi meydana getirmiştir. Şekil 8 incelendiğinde ise uçucu eklenmesi 90 günlük yaşta C-S-H yoğunluğunu %33,99, silis dumanı kullanılmasında %28,47 ve silis dumanı+uçucu kül kullanılmasında ise %30,18 oranında artma meydana geldiği görülmüştür.

Sonuç olarak, yukarıda belirtilen özelliklere ilave olarak ekonomik avantajları ve çevreye olan katkıları da düşünüldüğünde uçucu kül ve silis dumanının çimento yerine kullanılabilir olduğu görülmüştür. Erken yaş dayanımı gerektirmeyen durumlarda çimento yerine %10 oranında uçucu külün ve erken dayanım dahil bütün yaşlarda ise silis dumanını ve bunların ikili karışımının kullanılması, katkısız betona göre birçok avantaj sağlayacaktır.

Betonun mikro yapı analizi ve hidrasyon olayı incelenirken XRD analizinin SEM analizi ile birlikte değerlendirilmesi agrega arayüzey yapısındaki değişimler için daha iyi sonuç elde edileceği sonucuna varılmıştır. XRD

ile beton kesitlerinde sağlanacak verilerle hidrasyon gelişimi ve hidrasyon ürünlerinin miktarının, betonun yaşının ve dayanım değerleri gibi özelliklerin tespiti mümkün olmaktadır.

Semboller

CH	Kalsiyum hidroksit
C-S-H	Kalsiyum silikat hidrat
XRD	X-Işını kırınımı
KN	Kontrol numunesi
SD5	%5 silis dumanı içeren numune
SD10	%10 silis dumanı içeren numune
SD15	%15 silis dumanı içeren numune
SD20	%20 silis dumanı içeren numune
UK5	%5 uçucu kül içeren numune
UK10	%10 uçucu kül içeren numune
UK15	%15 uçucu kül içeren numune
UK20	%20 uçucu kül içeren numune
SDUK5	%5 silis dumanı + uçucu kül içeren numune
SDUK10	%10 silis dumanı + uçucu kül içeren numune
SDUK15	%15 silis dumanı + uçucu kül içeren numune
SDUK20	%20 silis dumanı + uçucu kül içeren numune

Kaynaklar

- [1] Uzbaş, B., 2004. imento Esaslı Malzemlerin Tek Eksenli Yük Altındaki Davranışının Mezo Düzey Modellenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstits, Erzurum.
- [2] Aydın A.C, Gl R., 2007. Influence of volcanic originated natural materials as additives on the setting time and some mechanical properties of concrete. *Construction and Building Materials* 21, 1277-1281.
- [3] Oğuz E., Aydın A.C., 2003. Prediction of adsorption rate of phosphate removal from wastewater with gaz concrete. *International Journal of Environment and Pollution* 19 (16), 603-614.
- [4] Aydın A.C.,2007. Self compactability of high volume hybrid fiber reinforced concrete. *Construction and Building Materials* 21, 1149-1154.
- [5] Ranjbar N., Mehrali M., Behnia A., Alengaram U. J., Jumaat M. Z., 2014. Compressive strength and microstructural analysis of fly ash/palm oil fuel ash based geopolymer mortar. *Materials and Design* 59, 532-539.
- [6] Jozic D., Zelic J., 2006. The effect of fly ash on cement hydration in aqueous suspensions. *Faculty of Chemical Technology, Seramics – Silikaty* 50 (2), 98-105.
- [7] Kurt M., Gl M.S., Gl R., Aydın A.C., Kotan T.,2016. The effect of pumice powder self-compactability of pumice aggregate lightweight concrete. *Construction and Building Materials* 103, 36-46.
- [8] Muller A. C. A., Scrivener K.L., Skibsted J., Gajewicz A.M., McDonald P.J., 2015. Influence of silica fume on the microstructure of cement pastes: New insights from H NMR relaxometry. *Cement and Concrete Research* 74, 116–125.
- [9] alışkan S., 2003. Aggregate/mortar interface: influence of silica fme at the micro and macro-level. *Cement and Concrete Composites* 25, 557–564.
- [10] Saad M., Abo-El-Enein S.A., Hanna G.B., Kotkata M.F., 1996. Effect of silica fme on the phase composition and microstructure of thermaly treated concrete. *Cement and Concrete Research*, 26 (10), 1479-1484.
- [11] Nath, P., Sarker P.,2011 Effect of Fly Ash on the Durability Properties of High Strength Concrete. *Procedia Engineering* 14, 1149–1156.
- [12] Arioz E., Arioz ., Kokar .M., 2013. Mechanical and Microstructural Properties of Fly Ash Based Geopolymers. *International Journal of Chemical Engineering and Applications*, 4 (6), 397-400.
- [13] Nadaf M.B., Manda J. N., 2013 *Experimental Studies and Analyses for Basic Characterization of Fly Ash. Proceedings of 4th Global Engineering, Science and Technology Conference.*
- [14] Wong Y.L., Lam L., Poon C.S., Zhou F.P., 1999. Properties of fly ash-modified cement mortar-aggregate interfaces. *Cement and Concrete Research* 29, 1905–1913.
- [15] Rong Z.D., Sun W., Xiao H.J., Wang W., 2014 Effect of silica fume and fly ash

on hydration and microstructure evolution of cement based composites at low water–binder ratios. *Construction and Building Materials* 51, 446–450.

[16] Tangüler M., Gürsel P., Meral Ç., 2015. Türkiye’de Uçucu Küllü Betonlar İçin Yaşam Döngüsü Analizi. ResearchGate.

[17] Kruse K., Jasso A., Folliard K., Ferron R., Juenger M., Drimalas T., 2012. Characterizing Fly Ash. The University of Texas, CTR Technical Report , 6648 (1).

[18] Kurt M., Aydın A.C., Gül M.S., Gül R., Kotan T., 2015. The effect of fly ash to self-compactability of pumice aggregate lightweight concrete. *Indian Academy of Sciences Sadhana* 40 (4), 1343-1359.

[19] Liu J., Qiu Q., Xing F., Pan D. Permeation Properties and Pore Structure of Surface Layer of Fly Ash Concrete. *Materials*, 7, 4282-4296, 2014.

[20] Yeğınobalı A., 2009. Silis Dumanı ve Çimento ile Betonda Kullanımı. Türkiye Çimento Mühtahsilleri Birliği, 62 sayfa, Ankara.

[21] Nochaiya T, Wongkeo W, Chaipanich A., 2010. Utilization of fly ash with silica fume and properties of portland cement–fly ash-silica fume concrete. *Fuel* 89, 768-774.

[22] Thomas M.D.A., Shehata M.H., Shashiprakash S.G., Hopkins D.S., Cail K., 1999. Use of ternary cementitious systems containing silica fume and fly ash in concrete. *Cement and Concrete Research*, 9, 1207-1214.

[23] Demir İ., 2009. Aynı Oranda İkame Edilen Silis Dumanı ve Uçucu Küllün Betonun Mekanik Özelliklerine Etkisi. *Int. J. Eng. Research and Development* 1(2).

[24] BaltakysK., Jauberthie R., SiaucinasR., Kaminskas R., 2007. Influence of modification of SiO₂ on the formation of calcium silicate hydrate. *Materials Science-Poland* 25(3).

[25] Topcu İB, Canbaz M., 2002. An investigation of the interfaces of silica fume concrete. ECAS2002 International Symposium on Structural and Earthquake Engineering, 469-476. Ankara, Türkiye.

[26] Flogbade S.O., 2012, Effect of fly ash and silica fume on the sorptivity of concrete. *International Journal of Engineering Science and Technology*, 4(9).

[27] Ikram M., 2016. High volume fly ash-strength development in concrete: a review. *International Journal of Advanced Structures and Geotechnical Engineering*, 5 (2), 52-57.

[28] Stutzman PE., 2001. Scanning electron microscopy in concrete petrography. *The American Ceramic and Society* 59-72.

[29] Elena J, Lucia MD., 2012. Application of x-ray diffraction (XRD) and scanning electron microscopy (SEM) methods to the portland cement hydration process. *Journal of Applied Engineering Sciences* 2 (15), 35-42.

[30] Temiz H., Karakeçi A.Y., 2002. An investigation on microstructure of cement paste containing fly ash and silica fume. *Cement and Concrete Research* 32, 1131 – 1132.

[31] Sahoo S., 2016. A Review of Activation Methods in Fly Ash and the Comparison in Context of Concrete Strength. *Journal of Basic and Applied Engineering Research*, 3 (10), 883-887.

[32] Dorum A., Koçak Y., Yılmaz B., Uçar A., 2010. Uçucu Kül Katkılı Çimento Hidratasyonuna Elektrokinetik Özelliklerin Etkisi. Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 25(3), 449-457.