T.C.

SELÇUK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FARKLI KARIŞIM YÖNTEMLERİ İLE KULLANILAN F TİPİ UÇUCU KÜLÜNÜN ÇİMENTO HARCININ BAZI ÖZELLİKLERİNE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

Marwan ALITHAWI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Ocak-2021

KONYA

Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Marwan ALITHAWI tarafından hazırlanan “Farklı Karışım Yöntemleri ile Kullanılan F Tipi Uçucu Külünün Çimento Harcının Bazı Özelliklerine Etkilerinin İncelenmesi” adlı tez çalışması 27/01/2021 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri	**İmza**
Başkan	
Prof. Dr. Hicran AÇIKEL	……..
Danışman	
Dr. Öğretim Üyesi Arife AKIN	……..
Üye	
Prof. Dr. Ülkü S. KESKİN	……..

ÖZET

YÜKSEK LİSANS

FARKLI KARIŞIM YÖNTEMLERİ İLE KULLANILAN F TİPİ UÇUCU KÜLÜNÜN ÇİMENTO HARCININ BAZI ÖZELLİKLERİNE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

Marwan ALITHAWI

Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Arife AKIN
202l, 69 Sayfa

Jüri
Prof. Dr. Hicran AÇIKEL
Prof. Dr. Ülkü S. KESKİN
Dr. Öğretim Üyesi Arife AKIN

Beton, dünya genelinde en çok kullanılan yapı malzemesidir. Betonda kullanılan çimentonun üretim süreci çevresel etkilere (sera gazı ve toz emisyonu) neden olmakta ve önemli ölçüde enerji tüketmektedir. Agrega beton hacminin %70 ile 80'ini oluştururken, çimento üretimi ve yüksek hacimde agrega kullanımı doğal kaynakların hızla tükenmesine sebep olmaktadır. Bu malzemelerin herhangi birinin endüstriyel atık malzemelerle değiştirilmesi atık bertarafı sorununu, enerji ve doğal kaynakların yoğun kullanımını azalttığı için çevre üzerinde olumlu bir etkiye sahiptir. Betonda agrega veya çimento ikamesi olarak kullanılabilecek birçok endüstriyel atık vardır. Bu nedenle bu tez, bu atıklardan birisi olan uçucu külün çimento ve ince agregaların kısmi ikamesi olarak kullanılmasına odaklanmıştır. Uçucu kül, kömür yakma işleminin bir yan ürünü olarak açığa çıkan atık bir malzemedir. Uçucu külün fiziksel ve kimyasal özellikleri çimentoya benzer. Bu özellikler uçucu külün betonda kullanılmasına olanak sağlar. Bu araştırmanın temel amacı, betonda çimento ve ince agregalara alternatif olarak uçucu kül kullanımının uygulanabilirliğini, betonun dayanım ve dayanıklılık özelliklerine etkisini belirlemektir. Bu çalışmada uçucu küller karışımlar içerisinde üç farklı karışım yöntemi ile kullanılmıştır. Bunlar; Basit ikame yöntemi, ilave yöntemi ve kısmi ikame yöntemidir. Her bir yöntemde %10, %20 ve %30 oranında ağırlıkça malzeme çıkarılmış, yerine uçucu kül eklenerek toplam on farklı karışım hazırlanmıştır. Her bir karışımdan 9 adet 50x50x50 mm boyutlarında küp,15 adet 40x40x160 mm boyutlarında kiriş, 11 adet Ø100/200 mm boyutlarında silindir numune hazırlanmıştır. 7., 28. ve 90. günler sonunda numuneler üzerinde dayanım, geçirimlilik deneyleri ve 28 günlük numunelere donma-çözülme deneyi yapılmıştır. Ayrıca, karışımların taze haldeki özelliklerinin belirlenmesinde, çökme ve birim ağırlık deneyleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara dayanarak, uçucu külün karışımlara dahil edilmesi işlenebilirliği iyileştirmiştir. Donma-çözülme direnci, su emme ve kılcal su emme oranı uçucu kül içeriğinin artmasıyla

artmıştır. Karışımlara uçucu kül ilave edilmesi ileri yaşlarda basınç, eğilme ve silindir yarma dayanımlarının daha iyi olmasını sağlamıştır. Çalışmada kullanılan yöntemler açısından sonuçlara bakıldığında basınç, su emme ve kılcal su emme deneylerinde ilave yönteminin, diğer yöntemlere göre daha iyi sonuçlar verdiği, eğilme ve silindir yarma deney sonuçlarına göre ise, kısmi ikame yöntemi ile hazırlanan karışımların diğer karışım yöntemlerine kıyasla daha yüksek çıktığı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Basit İkame Yöntemi, Donma-Çözlüme, Geçirimlilik Özellikleri, İlave Yöntemi, Kısmi İkame Yöntemi, Mekanik Özellikler, Uçucu Kül.

ABSTRACT

MS THESIS

INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF F-TYPE FLY ASH USİNG DİFFERENT MİXİNG METHODS ON SOME PROPERTİES OF CEMENT MORTAR

Marwan ALITHAWI

THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF SELÇUK UNIVERSITY
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE
IN CIVIL ENGINEERING

Advisor: Dr. Öğr. Üyesi Arife AKIN

2021, 69 Pages

Jury
Prof. Dr. Hicran AÇIKEL
Prof. Dr. Ülkü S. KESKİN
Dr. Öğretim Üyesi Arife AKIN

Concrete is the most widely used building material worldwide. The production process of cement used in concrete causes environmental effects (greenhouse gas and dust emissions) and consumes significant energy. Aggregate accounts for between 70 and 80% of the volume of concrete, while cement production and the use of high volumes of aggregate lead to rapid depletion of Natural Resources. Replacing any of these materials with industrial waste materials has a positive impact on the environment, as it reduces the problem of waste disposal, intensive use of energy and Natural Resources. There are many industrial wastes in concrete that can be used as aggregates or cement substitutes. Therefore, this thesis focuses on the use of fly ash, one of these wastes, as a partial substitute for cement and fine aggregates. Fly ash is a waste material that is released as a byproduct of the coal burning process. The physical and chemical properties of fly ash are similar to cement. These properties allow fly ash to be used in concrete. The main aim of this research is to determine the applicability of the use of fly ash as an alternative to cement and fine aggregates in concrete and its effect on the strength and durability properties of concrete. In this study, fly ash was used in mixtures with three different mixing methods. These are; simple substitution method, addition method and partial substitution method. In each method, 10%, 20% and 30% weight material was removed and a total of ten different mixtures were prepared by adding fly ash instead. 9 cubes with dimensions of 50x50x50 mm,15 beams with dimensions of 40x40x160 mm, 11 cylinder samples with dimensions of Ø100/200 mm were prepared from each mixture. At the end of the 7th, 28th and 90th days, strength, permeability tests and freeze-thaw tests were performed on the samples of 28 days. In addition, slump and unit weight tests were carried out to

determine the properties of the mixes in fresh state. Based on the results obtained, the inclusion of fly ash in the mixtures improved workability. Freeze-thaw resistance, water absorption and capillary water absorption rate increased with the increase of fly ash content. The addition of fly ash to the mixtures has provided better compressive, bending and cylinder splitting strengths in advanced ages. Considering the results in terms of the methods used in the study, it was seen that the addition method gave better results than other methods in compressive, water absorption and capillary water absorption tests, and according to the bending and roller splitting test results, the mixtures prepared with the partial substitution method were higher than other mixing methods.

Keywords: Addition Method, Fly Ash, Freeze-Thaw, Mechanical Properties, Partial Substitution Method, Permeability Properties, Simple Substitution Method.

ÖNSÖZ

Yüksek lisans çalışmalarımın her aşamasında yardım ve desteğini benden esirgemeyen, danışman hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Arife AKIN ’a teşekkürlerimi sunarım.

Deneylerin yapımında yardımcı olan arkadaşlarım Salah ALSHLASH ve Mohammed ALSDUDI yardımlarından dolayı teşekkürü borç bilirim. Proje kapsamında kullanılan uçucu küllerin temininde desteklerinden ötürü Çayırhan Termik Santrali’ ne teşekkürü ederim.

Öğrenim hayatım boyunca bana maddi manevi her türlü yardımlarından dolayı aileme teşekkürlerimi sunarım.

Marwan ALITHAWI

KONYA-2021

İÇİNDEKİLER

ÖZET ..... **III**

ABSTRACT ..... **V**

ÖNSÖZ ..... **VII**

İÇİNDEKİLER ..... **VIII**

SİMGELER VE KISALTMALAR ..... **X**

1. GİRİŞ **1**

1.1 Uçucu Küller 2
1.2 Uçucu Küllerin Sınıflandırılması 3
1.3 Uçucu Küllerin Kimyasal ve Fziksel Özellikleri 3
1.4 Uçucu Külün Betonda Kullanılması 4
1.4.1 Avantajlar 4
1.4.2 Dezavantajlar 5
1.4.3 Betonda uçucu kül kullanılmasının ekonomik ve çevresel etkileri 5
1.5 Uçucu Küllü Betonlarda Karışım Oranlama Yöntemleri 5
1.5.1 Çimentonun yerine kısmi olarak uçucu kül kullanılması (Basit ikame yöntemi) 6
1.5.2 Uçucu külün ince agrega olarak kullanılması (İlave yöntemi) 6
1.5.3 Uçucu külün kısmi olarak çimento ve ince agrega yerine kullanılması (Kısmi ikame yöntemi) 6

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI **8**

3. MATERYAL VE YÖNTEM **16**

3.1 Kullanılan Malzemelerin Özellikleri 16
3.1.1 Çimento 16
3.1.2 Uçucu küller 16
3.1.3 Agregalar 17
3.2 Karışımların Hazırlanması 18
3.3 Taze beton deneyleri 20
3.3.1 Birim ağırlık deneyi 20
3.3.2 Yayılma deneyi 21
3.4 Sertleşmiş beton deneyleri 22
3.4.1 Mekanik deneyler 22
3.4.1.1 Basınç dayanımı deneyi 22
3.4.1.2 Eğilme dayanımı deneyi 23
3.4.1.3 Silindir yarma deneyi 24
3.4.2 Dayanıklılık deneyleri 25
3.4.2.1 Donma-çözülme deneyi 25
3.4.3 Geçirimlilik deneyleri 26
3.4.3.1 Kılcal su emme deneyi 26

3.4.3.2 Su emme deneyi 28

4. DENEY SONUÇLARI 30

4.1 Birim Ağırlık Deneyi 30
4.2 Yayılma Deneyi 31
4.3 Basınç Deneyi 33
4.4 Eğilme Deneyi 36
4.5 Silindir Yarma Deneyi 39
4.6 Donma-Çözülme Deneyi 43
4.7 Su Emme Deneyi 45
4.8 Kılcal Su Emme Deneyi 48

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 51

5.1 Sonuçlar 51
5.2 Öneriler 54

KAYNAKLAR 55

ÖZGEÇMİŞ 58

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

AI_2O_3	:Aluminyum oksit
$Ca(OH)_2$	:Kalsiyum hidroksit
CaO	:Kalsiyum oksit
CO_2	:Karbondioksit
C-S-H	:Kalsiyum silika hidrate
fe	:Eğilme dayanımı
Fe_2O_3	:Demir oksit
I	:kılcal su emme
K_2O	:Potasyum oksit
MgO	:Magnezyum oksit
Na_2O	:Sodyum Oksit
^oC	:Santigrat derece
Sa	:Su emme
SiO_2	:Silisyum oksit
SO_3	:Kükürt Tri Oksit
Wk	:Kuru Ağırlık
Ws	:Yaş Ağırlık
μm	:Mikrometre
σ	:Yarma dayanımı

Kısaltmalar

A	:Kum
ASTM	:American Society for Testing and Materials
C	:Çimento
CEM	:Avrupada çimento türlerine verilen genel ad
dk	:dakika
D.Ç.	:Donma Çözülme
F-UK	:F sınıfı uçucu kül
HVFA	:High volume fly ash
KK	:Kızdırma kaybı
MPa	:Pascal (birim) megapascal
TS	:Türk standar
sn	:saniye
UK	:Uçucu kül

1. GİRİŞ

Beton, modern dünyada en çok kullanılan, en yaygın yapı malzemesidir. Betonun dayanıklılığı, agresif ortamlarda uzun hizmet ömrü sağlamak için önemli bir husustur. Portland çimentosu, beton üretiminde kullanılan ana bileşenlerden biri olmakla birlikte, inşaat sektöründe tamamen yerine geçebilecek alternatifi olmayan ve nispeten yüksek maliyetli bir malzemedir. Çok miktarda çimento üretimi çevresel sorunlara neden olmakta, aynı zamanda fazla miktarda enerji tüketmektedir. Dünyadaki toplam sera gazı emisyonunun yaklaşık % 7'sine neden olmaktadır (Saha, 2018). Bu yüksek hacimli CO_2, beton endüstrisinin yüksek karbon ayak izinin nedenlerinden biridir. 2014 yılında çimento üretimi 4 milyar tona ulaşmıştır (Van Oss, 2015). Ayrıca, gelişmekte olan ülkeler daha yüksek yaşam standartlarına ulaşmaya çalıştıkça gelecekte beton kullanımının artması beklenmektedir. Bu nedenle çimento ve agregaların yerine alternatif kaynakların kullanılması zorunlu bir durum gibi görünmektedir. Bu durumda, mühendisler ve bilim adamları ya beton üretimini sürdürerek ekosistemi yok etmek ya da CO_2 emisyonlarını azaltarak doğal kaynakları korumak için alternatif bir metodoloji aramak gibi çok önemli bir kararla karşı karşıya kalmaktadır (Rissanen ve ark., 2017). Endüstriyel atık malzemelerin geri dönüştürülmüş malzemeler olarak kullanımı, atık bertarafı sorununu, enerji ve doğal kaynakların yoğun kullanımını azalttığı için ve bazı çevresel endişelerin çözümüne yardımcı olabildikleri için betonda alternatif kaynaklar olarak kullanılabilirler. Plastik, uçucu kül, kauçuk, çelik cürufları ve deri atıkları gibi betondaki agrega ve çimentonun yerine geçme potansiyeline sahip birçok endüstriyel atık ürün bulunmaktadır. Bu endüstriyel atıklardan biri olanuçucu kül, puzolanik yapısı sayesinde çimento yerine kısmen kullanılabilmekte ve bu sayede çimento üretiminden kaynaklanan karbon emisyonlarını ve endüstriyel atık miktarını azaltabilmektedir.

Uçucu küller beton içerisinde üç farklı karışım yöntemi ile kullanılabilmektedir (Berry and Malhotra, 1986). Bunlar; Basit ikame yöntemi, ilave yöntemi ve kısmi ikame yöntemidir. Basit ikame yönteminde, belli bir miktar çimento karışımdan çıkarılmakta ve yerine aynı miktarda uçucu kül konulmaktadır. Bu yöntemle üretilen betonların erken yaşlardaki dayanımları düşüktür. Basit ikame yönteminin kullanılmasındaki başlıca amaç, kütle beton üretiminde hidratasyon ısısını düşürmek ve işlenebilirliği arttırmaktır. Ayrıca, bu yöntem çevresel ve ekonomik olarak

değerlendirilebilir. İlave yönteminde, karışımdaki çimento miktarı değiştirilmeden karışımdan ince agrega çıkarılarak yerine uçucu kül eklenir. Böylece karışımdaki bağlayıcı madde miktarı artar. Bu yöntemin kullanımındaki temel amaç ise, betonun ileriki yaşlardaki dayanımını arttırmak, mikro yapısı daha yoğun daha geçirimsiz bir beton elde etmektir. Kısmi ikame yönteminde ise, karışımdan çıkarılan çimento ve ince agrega yerine uçucu kül konulmaktadır. Bu yöntemde yukarıda sayılan iki yöntemin sağladığı olumlu özelliklerden optimum faydanın sağlanması amaçlanmaktadır. Bu çalışmada, üç farklı oranda uçucu kül üç farklı karışım yöntemi (harç karışımı içerisindeki bileşenler ile ikame yöntemi) ile karışımlara ilave edilerek taze ve sertleşmiş haldeki harç özelliklerine etkileri araştırılmıştır. Literatürde yaygın olarak uçucu küller harç içerisinde çimento ile ikame edilerek kullanılmaktadır (Akyüncü, 2012). Bu çalışmada farklı olarak uçucu külün hem çimento ile hem de agrega ile eşit oranlarda ikamesi ile karışım özelliklerine etkileri araştırılmıştır. Taze haldeki karışımların kıvam ve birim ağırlık değerleri; sertleşmiş numuneler üzerinde dayanım, geçirimlilik ve dayanıklılık özelliklerinin belirlenmesine yönelik çeşitli deneyler yapılmıştır. Mekanik özelliklerinin belirlenmesinde basınç, eğilme ve silindir yarma; geçirimlilik özelliklerinin belirlenmesinde su emme ve kılcal su emme; dayanıklılık özelliklerinin belirlenmesinde ise donma-çözülme deneyleri yapılmıştır. İlk bölüm, bu araştırmanın kapsamını ele alan giriş bölümüdür. Giriş bölümünde uçucu kül hakkında temel bilgiler verilmiş, uçucu külün betonda kullanımının avantaj ve dezavantajlarından bahsedilmiştir. İkinci bölüm literatürün gözden geçirilmesini içermektedir. Üçüncü bölüm kullanılmış malzemeler hakkında temel bilgiler verilmiş, ayrıca yapılan deneyler ayrıntılı olarak açıklamıştır. Dördüncü bölümde, deneylerden elde edilen sonuçlar tartışılmış ve analiz edilmiştir. Sonuç ve öneriler bölümünde ise, deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen veriler ışığında genel bir değerlendirme yapılmış ve bundan sonra yapılacak çalışmalar için önerilerde bulunulmuştur.

1.1 Uçucu Küller

Uçucu küller, kömürle çalışan termik santrallerin yan ürünleridir. Uçucu kül, sulu ortamda kalsiyum hidroksit (CH) ile kimyasal olarak tepkimeye girerek hidrolik bağlayıcılık gösteren silisli veya silisli-alüminli bir malzemedir. Kömürün içinde bulunan bazı inorganik maddeler yanma sırasında oluşan yüksek sıcaklıklarla

ayrışmakta ve bacadan atılırken soğuyarak küresel tanecikler oluşturmaktadır. Uçucu kül adı verilen bu tanecikler elektrofiltrelerle ve siklonlarla yakalanmaktadır. Bu sayede doğrudan atmosfere karışmaları engellenmektedir. Böylece çevre ve hava kirliliği mümkün olduğunca önlenmiş olmaktadır (Rkein, 2015). Uçucu küller, günümüzde inşaat sektörü başta olmak üzere birçok alanda kullanılmaktadır. İnşaat sektöründe ise katkılı çimento ve beton üretiminde, Portland Çimentosu üretiminde hammadde olarak, beton ve asfalt yol yapımında, bazı geoteknik uygulamalarda, hafif agrega üretiminde, tuğla, kiremit ve seramik üretiminde, dolgu malzemesi olarak kullanımı örnekolarak sayılabilir (Akyüncü, 2012).

1.2 Uçucu Küllerin Sınıflandırılması

Uçucu küller termik santralde kullanılan yakıt tipine göre ikiye ayrılır;

1. Taş kömürü uçucu külleri

2. Linyit kömürü uçucu külleri

ASTM C618'e göre uçucu küller F ve C sınıfları olmak üzere ikiye ayrılırlar. Taş kömürünün yanması sonucu F sınıfı uçucu küller elde edilmektedir. F tipi uçucu küller %10'dan daha az CaO içerdikleri için düşük kireç külü olarak da adlandırılır. C sınıfı uçucu küller ise linyit kömürünün yanması sonucu elde edilmektedir ve içerisindeki CaO oranı %10'dan fazladır. Bu yüzden C sınıfı uçucu küllere yüksek kireçli uçucu küller denilmektedir.

1.3 Uçucu Küllerin Kimyasal ve Fziksel Özellikleri

Uçucu külün kimyasal bileşimi ve fiziksel özellikleri, esas olarak kömürün doğası ve fırının işleme koşullarına göre değişir. Uçucu külün kimyasal bileşimi, yakılan kömürün yapısına bağlı olarak büyük farklılıklar gösterir. Bununla birlikte, uçucu kül bileşiminin çoğu (SiO_2) 'dan oluşmaktadır. Yüksek kalsiyumlu uçucu külde kireç ve sülfat gibi daha fazla sayıda istenmeyen kimyasal bileşen bulunur ve bu durum C sınıfı uçucu külün kullanımını azaltır. Tablo 1.1'de F ve C sınıfları uçucu küllerin kimyasal özellikleri gösterilmektedir (Gamage ve ark., 2011).

Tablo 1.1. Uçucu küllerin kimyasal kompozisyonları (Gamage ve ark., 2011).

Bileşen	F Sınıfı Kül (%) (CaO < % 10)	C Sınıfı Kül (%)(CaO > % 10)
SiO2	43.6-64.4	23.1-50.5
Al2O3	19.6-30.1	13.3-21.3
Fe2O3	3.8-23.9	3.7-22.5
CaO	0.7-6.7	11.5-29
MgO	0.9-1.7	1.5-7.5
Na2O	0-2.8	0.4-1.9
KK	0.4-7.2	0.3-1.9

Uçucu kül partikülleri düzensiz bir küresel şekle sahiptir, çapları 0,5 µm ile 150 µm arasında değişir. Uçucu kül partiküllerinin boyutları ve şekilleri uçucu külü yakalamak için kullanılan ekipmanın türüne ve kullanılan kömürün cinsine göre değişiklik gösterir. Çalışma kapsamında kullanılmış olan F sınıfıuçucu külün fiziksel özellikleri Tablo 1.2'de verilmiştir.

Tablo 1.2. Uçucu küllerin kimyasal ve fiziksel özellikleri (Gamage ve ark., 2011).

Özellikleri	UK (F)
Özgül ağırlık (g/cm^3)	2.3
İncelik (cm^2/g)	2900
Nem içeriği (%)	19.75
Geçirimlilik (cm / saniye)	$4{,}87 \times 10^{-7}$
Maksimum Kuru yoğunluk (g/cm^3)	1.53

1.4 Uçucu Külün Betonda Kullanılması

1.4.1 Avantajlar

Uçucu küldeki ince partikül oranı çimentodakinden daha yüksek olduğundan, uçucu külün beton üzerindeki en önemli etkilerinden biri işlenebilirliğini arttırmasıdır. Böylece karışımın su ihtiyacını azaltır. Uçucu kül, betonun kohezyonunu arttırır, bunun sonucunda hem terleme hem de segregasyon azalır (Marthong ve Agrawal, 2012). Betonun sertleşmesi, çimento ile su arasında meydana gelen kimyasal bir reaksiyondur. Uçucu kül, bu reaksiyonun ilerlemesini yavaşlattığı ve hidrasyon ısısını azalttığı için reaksiyonda önemli bir rol oynar ve betondaki termal çatlakları en aza indirir (Rkein, 2015). Uçucu kül partikülleri, betonu daha yoğun hale getirerek kılcal boşlukları doldurur. Böylece betonun geçirgenliğini azaltır. Ayrıca, dayanıklılığını arttırır. Özetle, betonda uçucu kül kullanılması betonun dayanıklılığını, ileri yaş mukavemetini, işlenebilirliğini artırması, su ihtiyacını ve geçirgenliğini azaltması gibi birçok avantajlara sahiptir.

1.4.2 Dezavantajlar

Farklı uçucu kül türleri farklı özelliklere sahiptir. Uçucu kül kalitesi ve özellikleri betonun kalitesini belirler. Yüksek miktarda karbon içeren uçucu kül, hava içeriğinin ayarlanmasını zorlaştırır. Uçucu küllü beton, geleneksel betondan daha uzun priz süresi gerektirir. Aynı zamanda hidratasyon sürecini yavaşlatarak erken dayanımın düşük olmasına yol açar, bu da erken yüksek dayanımın gerekli olduğu beton yapılarda bir sorun olarak kabul edilebilir (Bremseth, 2010).

1.4.3 Betonda uçucu kül kullanılmasının ekonomik ve çevresel etkileri

Uçucu külün betonda kullanılması ekonomik ve çevresel faydalar sağlar. Uçucu kül içeren beton karışımları, geleneksel betondan daha ucuz olduğu düşünülmektedir. Portland çimentosu üretimi yüksek oranda karbondioksit (CO_2) yaymaktadır. Her bir ton çimento için bir ton CO_2 açığa çıkmaktadır (Van Oss ve Padovani, 2003). Çimentoyu uçucu kül ile değiştirmek, karbondioksit (CO_2) emisyonlarının azalmasına neden olur, bu da sera gazlarının ve olumsuz etkilerinin azalmasına yol açar ve aynı zamanda küresel ısınmanın etkilerini sınırlar. Ayrıca, betonda uçucu kül kullanılması, atık bertarafı sorununun çözülmesine yardımcı olduğu için bu yönden de çevre kirliliğinin azalmasına büyük ölçüde katkı sağlar. Öte yandan, her yıl milyonlarca ton uçucu kül üretilmekte, fakat bunun sadece %40'ı betonda kullanılabilmektedir. Kalanı içerik bakımında çimentodan farklı olduğu için betonda kullanılamaz ve genellikle atılmaktadır (Gamage ve ark., 2011).

1.5 Uçucu Küllü Betonlarda Karışım Oranlama Yöntemleri

Uçucu küllerin beton içerisinde kullanılabilmeleri için farklı karışım yöntemleri mevcuttur. Bunlardan başlıca üç tanesi (Pekmezci ve Uyan, 2001);

- Basit ikame yöntemi (Çimentonun yerine kısmi olarak uçucu külkullanılması)
- İlave yöntemi (Uçucu külün ince agrega olarak kullanılması)
- Kısmi ikame yöntemi (Uçucu külün kısmi olarak çimento ve ince agrega yerine kullanılması)

1.5.1 Çimentonun yerine kısmi olarak uçucu kül kullanılması (Basit ikame yöntemi)

Basit ikame yönteminde, belli bir miktar çimento karışımdan çıkarılmakta ve onun yerine aynı miktarda uçucu kül koyulmaktadır. Çıkardığımız çimentonun yerine eklediğimiz uçucu küller, İlk adımda az bağlayıcılık özelliği ortaya çıkarır ve ince agrega gibi davranırlar. Bu nedenle karışımın işlenebilirliği yükselmektedir. Bu şekilde üretilen betonların erken yaşlardaki dayanımları düşüktür. Yalnız ileriki yaşlardaki basınç ve eğilme dayanımları yüksektir. Hatta bazen sadece portland çimentosuyla üretilmiş kontrol beton dayanımlarından biledaha yüksek değerler alırlar. Basit ikame yönteminin uygulanmasında esas amaç, kütle beton üretiminde hidratasyon ısısını azaltmak ve işlenebilirliği yükseltmektedir. Diğer taraftan kullanılan uçucu külün yüksek veya düşük kireçli olması da kullanım sırasında farklılıklar sağlayabilmektedir (Pekmezci ve Uyan, 2001).

1.5.2 Uçucu külün ince agrega olarak kullanılması (İlave yöntemi)

İlave yönteminde, karışımdaki çimento miktarı değiştirilmeden karışıma uçucu kül ilave edilir. Uçucu külün ilave edilmesiyle karışımdaki bağlayıcı madde miktarı yükselir. Bu şekilde betonun su ihtiyacı ve kohezyonu yükselir. Betonun kullanım hedefine göre karışımda öbür düzenlemeler yapılmalıdır. Bu yaklaşım, sülfata dayanıklılığı temin etmek için en az çimento faktörü ile ince agrega yerine puzolan kullanımını yükseltmek için ilk dafa Price tarafından kullanılmıştır. Bu yöntemde betonun ileriki yaşlardaki dayanımı yükselmektedir (Pekmezci ve Uyan, 2001).

1.5.3 Uçucu külün kısmi olarak çimento ve ince agrega yerine kullanılması (Kısmi ikame yöntemi)

Kısmi ikame yönteminde, karışımdan çıkarılan çimento yerine farklı miktarda uçucu kül koyulmaktadır. Hemen sonrasıda ise ince agrega ile su miktarında değişiklik yapılarak düzenlenmektedir. Bu yöntemdaki daki ana hedef uçucu kül kullanımı ile oluşan ve dikkate almamız gereken en önemli dezavantaj olan erken yaşlardaki dayanım kaybını en aza düşürmektedir.

Bu oranlama yöntemleri uygulanırken, uçucu küllerin maliyeti düşürme ve işlenebilirliği yükseltme gibi avantajlarının düşünülmesi gereklidir. Tüm etkenler göz önüne bulundurarak ve deneme karışımları yapılarak optimum performansa ait karışım oranları belirlenmelidir (Pekmezci ve Uyan, 2001).

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Akyüncü (2012), yaptığı çalışmada, betonun F ve C tipi uçucu külün çimento ile değiştirilmesinden elde edilen mekanik özellikleri, verimlilik ve dayanıklılık etkilerini karşılaştırarak araştırmıştır. Üretimde F ve C tipi uçucu kül ve çimento tipi CEM I 42,5 R kullanılarak toplam 39 farklı karışım hazırlanmıştır. Referans olarak 260, 320, 400 kg/m³'lük betonları üretilerek her bir karışım için F ve C tipi uçucu kül karışımlarında altı seri üretilmiştir. Aynı işlenebilirlik yöntemine (15.5 ± 1.5 cm. Slump) göre geliştirilen uçucu kül ikameli betonun mekanik özellikleri araştırılmış ve k performans faktörlerini tanımlamak için Bolomey formülleri kullanılmıştır. Her seri için ön beton ile karışım suyu miktarları ele alınmıştır. Taze beton testleri olarak; çökme, birim ağırlık, hava içeriği ve sertleşmış beton testleri olarak; Basınç, eğilme, ultrason hızı, modül testleri, dayanıklılık testleri olarak; Kapiler su emme, donma-çözülme, sülfat etkisi ve hızlandırılmış klor geçirgenliği gerçekleştirilmiştir. Kontrol betonu ile aynı basınç dayanımı değerlerini veren uçucu küllü beton için etkinlik faktörü bulunmuştur. Sonuç olarak; F ve C tipi uçucu kül ile üretilen betonda, artan çimento dozu ile uçucu külün etkinliği artmıştır. Uçucu küllü betonun ultrason hızları hem 28. hem de 90. günde kontrol betonlarından daha yüksek olmuştur. Magnezyum sülfat etkisine maruz kalan beton, kontrol betonunda bozulmuş ve uçucu küllü betonda kontrol betonuna göre daha az bozulma bulunmuştur. Bu da uçucu külün kullanıldığı beton karışımlar boşluklarını iyi bir şekilde doldurmuş ve analiz edildiğinde tokluk açısından olumlu katkılar sağladığını göstermiştir.

Ankesh ve ark. (2019), çalışmadasertleşmiş betonun özellikleri, çimento kısmen uçucu kül ile değiştirilerek değerlendirilmiştir. Bu amaçla, ağırlıkça %0, %10, %20 ve %30 oranlarında uçucu kül, çimento ile ikame edilmiştir. Beton küpler dökülmüş ve 7, 14 ve 28 günlük kür süresi sonrasında basınç dayanımı test edilmiş, sonuçları kontrol küpü örnekleri ile karşılaştırılmıştır. Uçucu külün tüm çimento ikame oranlarında basınç dayanımında kademeli bir artış olduğu gözlenmiştir.

Bansal ve ark. (2015), bu çalışmada %10, %20, %30 oranında uçucu külün çimento ile kısmi olarak yer değiştirilmesi incelenmiştir. Deneysel araştırma için toplam 12 küp dökülmüş ve bunlardan referans için 3 numune ve her uçucu kül oranı

için 3 numune kullanılmıştır. Uçucu kül oranı %10 ile değiştirildiğinde basınç dayanımında 7 gün sonra %20 ve 28 gün sonra %50 oranlarında azalma görülmüştür. Uçucu kül oranı %20 ile değiştirildiğinde basınç dayanımında 7 gün sonra %7 ve 28 gün sonra %11 oranlarında artış görülmüştür. Uçucu kül oranı %30 olarak yer değiştirildiğinde ise basınç dayanımı 7 gün sonra %23 ve 28 gün sonra %19 oranlarında artmıştır.

Beglarigale ve ark. (2014), bu çalışmada, uçucu kül ilavesinin betonun geçirgenliği üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Ayrıca, uçucu külün çimento ile yer değiştirilmesi (çimento ağırlığına göre %15 ve %30) de araştırılmıştır. Bu amaçla iki farklı beton sınıfı (C25/30 ve C40/50) hazırlanmıştır. Çalışma kapsamında hava geçirgenliği testi, kılcal su emme, hızlandırılmış klor geçirimliliği, elektriksel direnç ve ultrases geçiş hızı test yöntemleri incelenmiştir. Basınç dayanımı ve ultrases geçiş hızı arasında iyi bir ilişki elde edilmiştir. Ancak ultrases geçiş hızı testinin sonucu geçirgenlik özellikleri için bir gösterge değildir. Çimentonun uçucu kül ile yer değiştirilmesi direnç değerlerini arttırmıştır. Azalan elektrik iletkenliği, takviye korozyonu açısından bir ölçü olabilir ve uçucu külün eklenmesi beton karışımının hava geçirgenliğini ve ayrıca kılcal su emme veya toplam su emilimini azaltmıştır.

Delikurt ve Sevim (2015), yaptıkları çalışmada, Sugözü termik santralinde atık olarak oluşan F tipi uçucu külün betonda mineral katkı olarak kullanımını araştırmışlardır. Beton karışım numunelerin basınç, eğilme, su emme, yangına dayanıklılık, ultrason ses frekansı, kapiler ve korozyon özellikleri açısından araştırılmıştır. Tüm Karışımlarda için su / bağlayıcı oranı 0.45 olarak seçilmiştir. Her karışımın çökme değerinin 15 ± 2 cm olması için hiper plastikleştirici madde kullanılmıştır. F sınıfı uçucu külün %0, %10, %20, %30, %40'ı çimento ile ikame edilerek karışımlar hazırlanmıştır. Sonuç olarak, çimento yerine uçucu kül ağırlığının % 10-20'si kullanılarak beton dayanım değerlerinin arttığını göstermiştir. Ayrıca, su emme ve kılcal geçirgenlik azalmıştır. Uçucu külün betonda mineral katkı olarak kullanılmasının teknik, ekonomik ve çevresel faydalar sağlayacağını görülmüştür.

Gencel ve ark. (2012), yaptıkları çalışmada çimentonun yerine kısmi olarak uçucu kül kullanılmıştır. Uçucu kül, çimento ile ağırlıkça %10, %20 ve %30

oranlarında ikame edilerek kullanılmış ve su/çimento oranı 0.40 olan harç numuneleri üretilmiştir. Taze beton deneyleri olarak; birim ağırlık ve hava içeriği deneyleri, sertleşmiş beton deneyleri olarak; basınç, eğilme, elastisite modülü deneyleri, dayanıklılık deneyleri olarak; su emme, donma-çözülme, korozyon dayanımı deneyleri yapılmıştır. Uçucu kül, betonun birim ağırlığını azaltırken betonun işlenebilirliğini ve hava içeriğini artmıştır. Betonun basınç dayanımı, eğilme dayanımıve elastisite modülü uçucu kül kullanımının artmasıyla azalmıştır. Donma-çözülme direnci ve su emme oranı uçucu kül içeriğinin artmasıyla artmıştır.

Golewski (2018), bu çalışmadabetona uçucu kül ilavesinin basınç dayanımı ve çekme dayanımı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Mekanik parametreleri değerlendirmek için basınç ve çekme dayanımı testleri yapılmış ve sonuçlar referans beton ile karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Karışımlar %0, %20, %30 oranlarında uçucu kül çimento ile yer değiştirilerek hazırlanmıştır. Deneyler sırasında, uçucu kül katkısı ile modifiye edilmiş betonların yaşının analiz edilen parametreler üzerindeki etkisi belirlenmiştir. Deneyler 3, 7, 28, 90, 180, 365 günlük kürden sonra gerçekleştirilmiş. Elde edilen sonuçlara dayanarak, uçucu kül içeren yeşil betonun yüksek basınç dayanımı ve çekme dayanımı ile yapılabileceği sonucuna varılmıştır.

Huang ve ark. (2013), çok yüksek hacimli F Sınıfı uçucu kül (HVFA) içeren betonla ilgili deneysel bir araştırma için %4.6 ve % 7.8'lik yanma kaybı olan iki farklı F tipi uçucu kül kullanılmıştır. Çimento için %20-80 uçucu kül değişimi ile beton için rasyonel bir karışım tasarım yöntemi geliştirilmiştir. Taze ve sertleşmiş beton özellikleri için deneyler yapılmıştır. Test sonuçları, uçucu kül betonunun priz sürelerinin ve hava içeriğinin uçucu kül değiştirme seviyesi arttıkça arttığını göstermiştir. HVFA beton karışımlarının basınç ve eğilme dayanımları, 91 ve 365 günlük geç yaşlarda sürekli ve önemli bir gelişme göstermiştir. Düşük uçucu kül içeren beton karışımı, yüksek uçucu kül içeren karışıma göre üstün mekanik özellikler göstermiştir. Bu sonuçlar, F tipi uçucu külün %80'e kadar, uygun karışım oranları kullanılarak betonda çimento yerine kullanılabileceğini onaylamıştır.

Jatale ve ark.(2013), çalışmada çimento yerine uçucu kül kullanılarak betonunun mukavemeti ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisi ele alınmaktadır.

Çimentonun uçucu külle kısmi ikamesinin etkisini incelemek için üç farklı uçucu kül oranı (%20, %40 ve %60) beton karışımlarına eklenmiştir. Bu çalışmada uçucu külün işlenebilirlik, priz süresi, yoğunluk, hava içeriği, basınç dayanımı, esneklik modülü üzerindeki etkisi incelenmiştir. Basınç testi, küp (150x150x150 mm boyutunda) numune üzerinde gerçekleştirilmiştir. Uçucu kül kullanımının betonun priz süresini biraz geciktirdiği gözlemlenmiştir. Aynı zamanda, çeşitli yaşlardaki mukavemet gelişimi oranının, beton karışımındaki su/çimento ve uçucu kül oranları ile ilişkili olduğu bulunmuştur. Ayrıca, uçucu kül oranı arttığında elastisite modülü azalmıştır.

Joshi (2017), bu çalışmada M20 beton karışımı için çimentonun %0, %10, %20 ve %30 uçucu kül oranları ile kısmen değiştirildiğinde beton karışımlarının basınç dayanımı araştırılmıştır. Beton karışım oranı 1:1.4:2.96 ve su/çimento oranı 0.50 olarak hazırlanmıştır. Deneysel araştırmayı gerçekleştirmek için 150 mm^3 boyutlarında toplam 24 küp dökülmüştür. Uçucu kül içermeyen normal betonun basınç dayanımını belirlemek için 6 küp dökülmüştür. Benzer şekilde, 6 küpün her bir seti, çimentonun sırasıyla %10, %20 ve %30 uçucu külle değiştirilerek basınç dayanımını belirlemek için dökülmüştür. Bu 6 küpten3'ü, 7 günlük betonun basınç dayanımını belirlemek için, 3'ü ise 28 günlük betonun basınç dayanımını belirlemek için kullanılmıştır. 7 gün ve 28 günlük küplerin ortalama basınç dayanımı, uçucu kül içermeyen normal beton için 13.86 N/mm² ve 20.58 N/mm² olarak bulunmuş ve uçucu kül oranı %30 olduğunda 10.11 N/mm² ve 16.35 N/mm²'ye düşmüştür. Betonun 28 günlük yaştaki basınç dayanımındaki azalma %10, %20 ve%30 çimentonun uçucu kül ile değiştirilmesi için %4.57, %12.20 ve %20.55 olarak bulunmuştur. Test sonuçları, uçucu kül oranı arttıkça betonun işlenebilirliğinin ve dayanıklılığının arttığını göstermektedir. Ayrıca, uçucu kül oranı arttıkça betonun basınç dayanımında azalma olduğu da elde edilmiştir. Çimentonun uçucu külle optimum değişimi %30'dur.

Kesharwani ve ark. (2017), bu çalışmada uçucu kül, çimento ile ağırlıkça %0, %25, %50, %75 ve %100 oranlarında ikame edilmiştir. Uçucu külün işlenebilirlik, priz süresi, basınç dayanımı ve su içeriği üzerine etkisi incelenmiştir. Çimentonun uçucu külle kısmi ikamesinin betonun özellikleri üzerindeki etkisini incelemek için farklı beton karışımları üzerinde deneyler yapılmıştır. Bu çalışmanın sonucunda uçucu külle

çimentonun %25 oranında değişimi ile mukavemet özelliklerinde belirgin bir artış olduğu kaydedilmiştir.

Koçak ve ark. (2011), yaptıkları çalışmada, çimento ve beton endüstrisinde yaygın olarak kullanılan uçucu külün betonun ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisini araştırmıştır. Bu amaçla CEM I 42.5 R Portland çimentosu yerine %0, %10, %20 ve %30 oranlarında uçucu kül karışımları kullanılmıştır. Her deney için 15 x 15 x 15 cm boyutlarında 3 adet beton numuneler üretilmiştir. Beton numuneler üzerinde birim ağırlık, su emme ve ultrason hızı, kapiler ve basınç dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneylerden elde edilen veriler üzerinde istatistiksel analiz yapılmıştır. Sonuç olarak, uçucu kül ikamesi ile elde edilen betonların su emme ve kapiler su emme miktarlarında artma görülürken; birim ağırlık, ultrases geçiş hızları ve basınç dayanımlarında azalma olduğu tespit edilmiştir. Bu çalışma sonucunda, uçucu külün ikame edilmesi ile elde edilen betonun su emme ve kılcal su emme; birim ağırlık, ultrason hızları ve basınç dayanımında düşüşler bulunmuştur.

Mao ve ark. (2016), bu çalışmada uçucu kül ince agrega olarak kullanılmıştır. Değiştirme oranı %0'dan %50'e kadar, 11 farklı çeşit C30 betonudökülmüştür. Standart buhar kürü ile betonun basınç ve eğilme dayanımı, farklı yaşlarda farklı değiştirme oranları altında test edilmiştir. Sonuçlar uçucu külün (ince agrega olarak) betonun basınç ve eğilme dayanımını artırabildiğini göstermektedir. %25 ikame oranlı uçucu kül, hidrasyon reaksiyonu verimliliği en iyisidir. Deney sonuçlarını analiz edildikten sonra, uçucu kül oranı ile beton basınç dayanımı ve eğilme dayanımı arasındaki ilişki elde edilmiştir.

Marthong ve Agrawal (2012), bu çalışmada çimento uçucu kül ile kısmen farklı oranlarda değiştirildiğinde betonun mekanik özellikleri ve dayanıklılığı incelenmiştir. Beton karışımının hazırlanması sırasında dört farklı oranda (%10, %20, %30 ve %40) uçucu kül kullanılmıştır. Betonun basınç, çekme dayanımı ve dayanıklılığı incelenmiştir. Deney sonuçlarına dayanılarak, uçucu kül oranı arttıkça basınç dayanımının azaldığı gözlenmiştir. Basınç dayanımı azalması erken yaşlarda sonraki yaşlara göre daha fazladır. Ayrıca, uçucu kül içeren betonun kontrol betonuna göre daha dayanıklı olduğu gözlenmiştir.

Nath ve Sarker (2011), bu çalışmada yüksek dayanımlı betonun dayanıklılık özellikleri F tipi uçucu kül kullanılarak incelenmiştir. Test numunelerinin hazırlanmasında için toplam çimento ağırlığının %30 ve %40'ı uçucu kül içerenbeton karışımları üretirlmiştir. Uçucu küllü ve kontrol beton numunelerinin basınç dayanımı, plastik büzülmesi, su emme ve hızlı klorür geçirgenliği belirlenmiştir. Basınç dayanımı, su emme ve hızlı klorür geçirgenliği testleri için Ø100/200 mm boyutlu silindirler, plastik büzülme testi için 75×75×280 mm boyutunda prizmalar dökülmüştür. Beton karışımlarının 28 günlük basınç dayanımı 65 ila 85 MPa arasında değişmiştir. Uçucu kül beton numuneleri, kontrol betonun ile aynı 28 günlük basınç dayanımı için tasarlandığında kontrol beton numunelerinden daha az plastik büzülme göstermiştir. Uçucu külün eklenmesi, 28. günde su emme ve klorür iyonu geçirgenliğini önemli ölçüde azaltmış ve 6. ayda bu azalma daha da artmıştır. Genel olarak, çimento yerine kısmi olarak uçucu külün eklenmesi, betonun dayanıklılık özelliklerini geliştirmiştir.

Padhye ve Deo (2016), beton karışımları uçucu kül içeriğinin değişen oranlarında hazırlanmış ve uçucu külün taze ve sertleşmiş betonun mekanik özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Ağırlıkça %0 (referans beton), %10, %20, %30, %40, %50 ve %60 oranlarında çimento yerine uçucu kül içeriği ile farklı beton karışımları üretilmiştir. Basınç deneyleri için 150mm boyutunda küp numunelerdökülmüştür. Betonun basınç dayanımı 7, 28 ve 45 gün boyunca ölçülmüştür. Betonun basınç dayanımı, uçucu külün artmasıyla azalır. Çalışmada yer alan deneyler neticesinde uçucu külün, maksimum %40 oranında ikame edilmesi, %40'ın üzerindeki ikame oranlarının beton karışımları için güvenli olmayabileceği sonucuna varılmıştır. Genel olarak, uçucu külün artmasıyla 7 ila 28 gün arasında önemli bir mukavemet artışı kaydedilmemiştir, bu da betonun erken mukavemetinin uçucu küldeki artışla azaldığını göstermektedir.

Reddy ve Reddy (2013), bu çalışma betonda uçucu kül kullanımının 7 ve 28 günlük basınç, çekme dayanımı ve dayanıklılık özellikleri üzerine detaylı bir deneysel çalışma sunmaktadır. Bu çalışmada uçucu kül, çimento ile ağırlıkça %0, %5, %10, %15 ve %20 oranlarında ikame edilmiştir. Dayanıklılık deneyleri için asit etkisi ve ağırlık kaybı oranı incelenmiş ve kontrol betonuyla karşılaştırılmıştır. Basınç ve çekme dayanımını belirlemek için (150x150x150 mm) standart küp ve (100x300 mm) standart

silindirler kullanılmıştır. Mekanik deneyleri için 30 küp ve 30 silindir, dayanıklılık deneyleri için 15 küp numunesi hazırlanmıştır. Test sonuçları betonda uçucu kül kullanımının, mukavemet ve dayanıklılığı arttırdığını göstermektedir. Optimum 7 ve 28 günlük basınç dayanımı %20 uçucu kül yer değiştirme oranında elde edilmiştir. Aynı zamanda betonun çatlama dayanımında da artışa neden olmuştur.

Rkein (2015), yaptığı çalışmada ince agrega ve çimentonun kısmen uçucu kül ile değiştirildiği beton karışımlarının mekanik özelliklerini değerlendirmek için yapılan deneysel bir araştırmanın sonuçlarını sunmaktadır. Uçucu kül, değişen oranlarda (%10, %20, %30, %40 ve %50) ince agrega ve çimento ile ilave ve basit ikame yöntemi ile karışıma eklenmiştir. Karışımların taze haldeki özelliklerinin belirlenmesinde çökme testi, sertleşmiş haldeki özelliklerinin belirlenmesinde ise basınç deneyi yapılmıştır. Basınç dayanımı 7, 28 ve 56. günlerde belirlenmiştir. Test sonuçları, basit ikame yönteminde %10 uçucu kül, ilave yönteminde %20 uçucu kül oranlarının maksimum basınç dayanımına ulaşabildiğini göstermiştir. Sonuçlar, uçucu külün ya ince agrega ya da çimentonun kısmi ikame edilmesiyle beton yapılarda etkin bir şekilde kullanılabileceğini göstermektedir.

Saha (2018), çalışma F sınıfı uçucu külün, bağlayıcı maddenin kısmi bir ikamesi olarak kullanılmasını değerlendirmektedir. Bu çalışmada uçucu kül, çimento ile ağırlıkça %0, %10, %20, %30 ve %40 oranlarında ikame edilmiştir. Uçucu kül numuneleri, kontrol numunelerine kıyasla düşük erken basınç dayanımı göstermiştir. Bununla birlikte, uçucu kül numuneleri puzolanik reaksiyon nedeniyle daha uzun süre mukavemet artışına devam ederken, kontrol numuneleri 56 günlük kürden sonra mukavemet artmasını durdurmuştur. Uçucu külün bir bağlayıcı olarak dahil edilmesi numunelerin gözenekliliğini azaltmıştır. Ayrıca, 28 ve 180 günlük kürlenme süresi içerisinde uçucu kül ikameli beton, su emme ve klorür geçirgenliğinde önemli bir azalma gözlenmiştir. Sonuç olarak, uçucu kül içeren numuneler düşük su emme ve klorür geçirgenliği göstermiştir.

Sama ve ark. (2014), yaptıkları çalışmada çimentonun kısmen uçucu külle değiştirilmesi ve çelik liflerin eklenmesinin betonun mukavemetine etkisi incelenmiştir. Dört çelik lif yüzdesi (%0, %1, %1.5 ve %2) kullanılmış ve çimento, iki F Tipi uçucu

kül yüzdesi (%40, %60) ile yer değiştirilmişir. Çalışmada çelik liflerle takviye edilmiş betonun basınç, çekme ve eğilme dayanımı belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar kontrol numunesi ile karşılaştırılmış ve incelenmiştir. Uçucu kül ve çelik lifler ilave edilmesinin optimum yüzdesinin %40 ve %2 olduğu belirlenmiş ve bu da çekme ve eğilme mukavemetinde bir artış göstermiştir.

Upadhyaya ve Chandak (2014), çalışma uçucu külün M20 tasarım betonunun basınç dayanımı üzerindeki etkilerini incelemiş ve uçucu külün %10'a kadar eklenmesinin betonun mukavemetinde ihmal edilebilir bir değişikliğe yol açtığını bulmuştur. Ayrıca, %30 uçucu kül içeren betonun, uçucu kül içermeyen betona kıyasla çok düşük basınç dayanımı gösterdiği gözlenmiştir.

Wankhede ve Fulari (2014), çalışmada uçucu külün beton üzerindeki etkisi incelenmiş ve betonun su/çimento oranında artış ve uçucu kül miktarında artış ile beton slumpının arttığı bulunmuştur. Ayrıca, %10 ve %20 çimentonun uçucu külle değiştirilmesi ile 28 günlük betonun normal betondan daha iyi basınç dayanımı gösterdiği, ancak çimentonun uçucu külle %30 değiştirilmesi durumunda betonun basınç dayanımının azaldığı sonucuna varılmıştır.

Zhang ve ark. (2019), bu çalışmada uçucu kül ince agrega olarak kullanılarak donma-çözülme direncini belirlemek için çoklu beton karışımları tasarlanmıştır. Beton numunelerinin donma-çözülme direncini değerlendirmek için ağırlık kaybı ve esneklik modülünü belirlemek için hızlı donma-çözülme testleri yapılmıştır. Karışımlarda (PÇ42.5R) Portland çimentosu tercih edilmiş ve bir termik santral tarafından üretilen F tipi uçucu kül kullanılmıştır. Donma-çözülme testleri için 100x100x400 mm boyutunda prizma şekilli numuneler kullanılmış ve kürlenme süresi boyunca basınç dayanımını ve yüksek sıcaklıkta basınç dayanımını ölçmek için 100x100x100 mm boyutunda küp numuneler hazırlanmıştır. Uçucu kül içeren beton normal betona göre yüksek donma-çözülme direncini göstermiştir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1 Kullanılan Malzemelerin Özellikleri

3.1.1 Çimento

Çalışmada, bağlayıcı malzeme olarak CEM I 42.5 R tipi çimento kullanılmıştır. Kullanılan çimento, Konya Çimento Sanayi tarafından temin edilmiştir. Çimentoya ait kimyasal ve fiziksel özellikler Tablo 3.1'de sunulmuştur.

Tablo 3.1. Karışımlarda kullanılan çimento kimyasal ve fiziksel özellikleri

Kimyasal Bileşimi (%)	**Çimento**
SiO_2	20.8
Al_2O_3	5.42
Fe_2O_3	2.98
S+A+F	29.2
CaO	61.53
MgO	2.39
SO_3	2.4
K_2O	0.75
Na_2O	0.21
Fiziksel Özellikleri	
Özgül ağırlık (g/cm^3)	3.06
İncelik (cm^2/g)	3250

3.1.2 Uçucu küller

Çalışmada kullanılan uçucu kül Çayırhan Termik Santralinden elde edilen F tipi uçucu küldür ve ASTM C 618'e göre incelendiğinde F sınıfı uçucu kül olarak kabul edilmektedir (Şekil 3.1). Uçucu külün kimyasal ve fiziksel özellikleri Tablo 3.2'de görülmektedir.



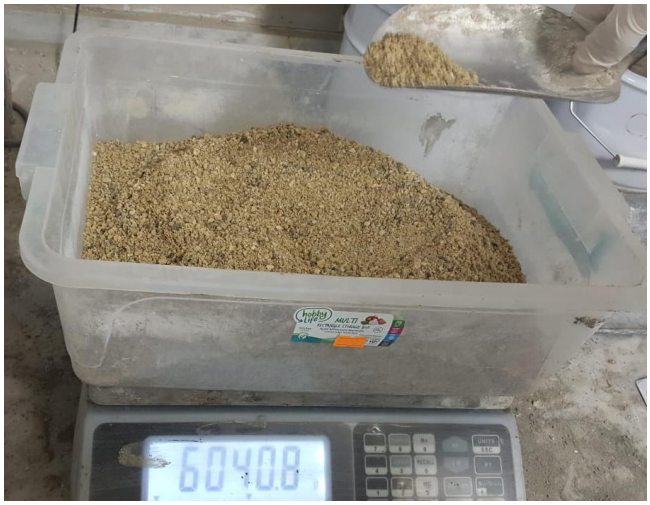
Şekil 3.1. Uçucu kül

Tablo 3.2. Karışımlarda kullanılan uçucu küllerin kimyasal ve fiziksel özellikleri

Kimyasal Bileşimi (%)	**UK (F)**
SiO_2	50.98
Al_2O_3	13.11
Fe_2O_3	9.74
S+A+F	73.83
CaO	11.82
MgO	3.91
SO_3	3.94
K_2O	1.91
Na_2O	2.71
KK	0.86
Fiziksel Özellikleri	
Özgül ağırlık (g/cm^3)	2.36
İncelik (cm^2/g)	2900

3.1.3 Agregalar

Çalışmada agrega olaraktane büyüklüğü 0-4 mm olan Konya Bölgesindeki yerel kaynaklardan elde edilmiş kum kullanılmıştır (Şekil 3.2).



Şekil 3.2. Kum

3.2 Karışımların Hazırlanması

Deneysel çalışmalar kopsamında bütün karışımlar Konya Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Malzemesi Laboratuvarı'nda yapılmıştır. Karışımlarda yer alan temel bileşenler; çimento, uçucu kül, kum ve sudur. Uçucu küller karışımlar içerisinde üç farklı karışım yöntemi ile kullanılmıştır. Bunlar,

- Basit ikame yöntemi (Çimentonun yerine kısmi olarak uçucu kül kullanılması).
- İlave yöntemi (Uçucu külün ince agrega olarak kullanılması).
- Kısmi ikame yöntemi (Uçucu külün kısmi olarak çimento ve ince agrega yerine kullanılması).

Her bir yöntemde %10, %20 ve %30 oranında ağırlıkça malzeme çıkarılmış, yerine uçucu kül eklenerek toplam on farklı karışım hazırlanmıştır. Tablo 3.3'te karışım kodları ve kullanılan malzeme miktarları verilmiştir.

Karışımların hazırlanmasında 25 lt. kapasiteli planet tipi mikser kullanılmıştır. Öncelikle kuru malzemeler (agregalar, çimento ve uçucu kül) 100 devir/dk. hızda 1 dakika karıştırılmıştır. Sonrasında su eklenmiş ve 150 devir/dk. hızda 1 dakika, son olarak 300 devir/dk. hızda 3 dakika karıştırılarak karıştırma işlemi tamamlanmıştır (Şekil 3.3).

Her bir karışımdan 9 adet 50x50x50 mm boyutlarında küp, 15 adet 40x40x160 mm boyutlarında kiriş, 11 adet Ø100/200 mm boyutlarında silindir numune hazırlanmıştır.

Hazırlanan karışımlar önceden yağlanmış olan kalıplara yerleştirilmiş, sıkıştırma işlemi için vibratör kullanılmıştır (Şekil 3.4). 24 saat sonra numuneler kalıplarından çıkartılarak, suyla dolu havuza koyulmıştır. 7., 28. ve 90. günler sonunda numuneler havuzdan alınmış ve üzerlerinde mekanik, dayanıklılık ve geçirimlilik deneyleri yapılmıştır.

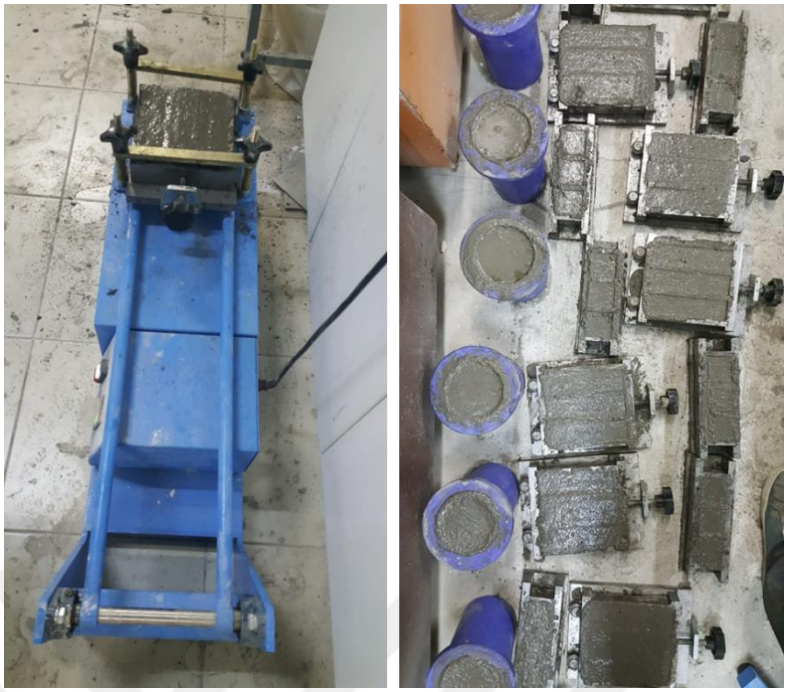
Tablo 3.3. Karışımlardaki malzeme miktarları gram cinsinden (1 dm^3 için gram cinsinden).

Karışım Kodu	Çimento (C)	F-UK (UK)	Kum (A)	Su
UK(0)	450	-	1350	225
UK(C10)	405	45	1350	225
UK(C5+A5)	427.5	90	1282.5	225
UK(A10)	450	135	1215	225
UK(C20)	360	90	1350	225
UK(C10+A10)	405	180	1215	225
UK(A20)	450	270	1080	225
UK(C30)	315	135	1350	225
UK(C15+A15)	382.5	270	1147.5	225
UK(A30)	450	405	945	225



(a) (b) (c)

Şekil 3.3. Karışımların hazırlanması a) Kum ilavesi, b) Çimento ve uçucu kül ilavesi, c) Suyun ilave edilmesi.



(a) (b)

Şekil 3.4. Numunlerin hazırlanması a) Karışımların vibratöryardımıyla sıkıştırılması, b) Kalıplara dökülmüş karışımlar.

Karışımların taze haldeki özelliklerinin belirlenmesinde, yayılma ve birim ağırlık deneyleri, sertleşmiş haldeki özelliklerinin belirlenmesinde ise mekanik, dayanıklılık ve geçirimlilik deneyleri yapılmıştır. Mekanik özelliklerinin belirlenmesinde basınç, eğilme ve silindir yarma, geçirimlilik özelliklerinin belirlenmesinde su emme ve kılcal su emme, dayanıklılık özelliklerinin belirlenmesinde ise donma-çözülme deneyleri yapılmıştır.

3.3 Taze beton deneyleri

3.3.1 Birim ağırlık deneyi

Birim ağırlık deneyi ASTM C138 standardına göre yapılmıştır. Hazırlanan beton birim ağırlık kabına yerleştirilerek tartılmıştır. Tartım sonucunda çıkan ağırlıktan kabın darası düşülecek, elde edilen ağırlık kabın hacmine bölünerek birim ağırlıklar hesaplanmıştır. Birim hacim ağırlığının bulunmasının nedeni, kalıp stabilitesi açısından taze beton ağırlığının önemli olmasıdır. Birim hacim ağırlığı çimentoya göre daha az olan uçucu külün farklı oranlarda ve farklı yöntemlerle kullanımı ile kontrol betonuna

göre ne oranda ağırlığın azaltılabileceği belirlenmiştir. Şekil 3.5' te birim ağırlık deneyi gösterilmiştir.



Şekil 3.5. Birim ağırlık deneyi

3.3.2 Yayılma deneyi

Yayılma tablası deneyi ASTM C230 standardına göre yapılmıştır. Hazırlanan karışımların sahip oldukları kıvamları hakkında bilgi vermesi açısından yayılma tablası deneyi uygulanmıştır. Karıştırma kabından tepsiye alınan harç, yayılma tablası üzerindeki kalıba yarısı dolacak şekilde yerleştirilmiş, tokmak ile 25 kez vurulduktan sonra kalıbın diğer kısmı doldurularak tekrar 25 vuruş daha uygulanmıştır. Kalıbın üst yüzeyi mala ile temizlenip düzeltildikten sonra, kalıp çekilerek alınmış deney aletinin kolu 15 sn'de 5 kez çevrilerek, yayılan karışımın çapı 2 farklı eksende metre yardımı ile ölçülmüş ve okunan değerlerin ortalaması kaydedilmiştir. Şekil 3.6'da yayılma deneyinin uygulanışı gösterilmiştir.



Şekil 3.6. Yayılma deneyi

3.4 Sertleşmiş beton deneyleri

Karışımların sertleşmiş haldeki özelliklerinin belirlenmesinde uygulanacak deneyler üç grupta incelenmiştir. Bunlar, mekanik özelliklerinin, geçirimlilik özelliklerinin ve durabilite özelliklerinin belirlenmesine yönelik deneylerdir. Mekanik özelliklerin belirlenmesinde basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve silindir yarma dayanımı testleri uygulanmıştır. Geçirimlilik özelliklerinin belirlenmesinde su emme ve kılcal su emme testleri, durabilite özelliklerinin belirlenmesinde ise donma-çözülme döngüleri altında numunelerin fiziksel ve dayanım değerlerindeki kayıplar değerlendirilmiştir. Basınç dayanımı testleri için 50x50x50 mm küp numuneler; eğilme ve donma-çözülme deneyleri için 40x40x160 mm boyutlu kiriş numuneler; silindir yarma, su emme ve kılcal su emme deneyleri için Ø100/200 mm boyutlu silindir numuneler hazırlanmıştır. Numunelerin hepsi deney gününe kadar 23±2 ^{0}C suda saklanmıştır. Sertleşmiş numuneler üzerinde gerçekleştirilecek olan mekanik ve geçirimlilik testleri üretimi izleyen 7., 28. ve 90. günler sonunda, donma-çözülme testi ise 28. gün sonunda yapılmıştır.

3.4.1 Mekanik deneyler

Mekanik özellikler kapsamında basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve silindir yarma dayanımı testleri yapılmıştır.

3.4.1.1 Basınç dayanımı deneyi

Çalışmada Tablo 3.3'te verilen oranlar kullanılarak hazırlanan karışımlar 50x50x50 mm küp kalıplara yerleştirildikten 24 saat sonra kalıplardan çıkarılarak deney gününe kadar su içerisinde kür edilmiştir.7., 28. ve 90. günlerde kürden çıkarılan küp numuneler basınç deneyine tabi tutularak dayanımları belirlenmiştir. Basınç dayanımı deneyi ASTM C39 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.7a). Şekil 3.7b' de basınç deneyi sonrasında kırılmış bir küp numunesi örneği gösterilmiştir.



(a) **(b)**

Şekil 3.7. a) Basınç deney düzeneği, b) Basınç deneyi sonrasında kırılmış küp numunesi

3.4.1.2 Eğilme dayanımı deneyi

Eğilme deneyi malzemenin mukavemetini ve malzemenin eğilmeye karşı mekanik özelliklerini tespit etmek amacı ile yapılan bir deneydir. Eksene dik doğrultuda yük taşıyan kiriş gibi elemanlar eğilmeye maruz kalırlar. Bu deneyin temel prensibi, deneyde kullanılacak malzemeyi basit kiriş modeli olarak kabul etmeye dayanmaktadır.

Kiriş numuneleri 7., 28. ve 90. günlük kür süreleri sonrasında sudan çıkarılmış, yüzeyi temiz bir bez yardımıyla kurulanmış ve daha sonra kiriş kırma deney aletine yerleştirilerek 3 noktalı eğilme yüklemesine maruz bırakılmıştır.

Eğilme deneyi Şekil 3.8'de gösterildiği gibi 40x40x160 mm boyutundaki kiriş numunelerde ASTM C293'e uygun olarak yapılmış ve eğilmede çekme dayanımı (fe) denklem 1 ile hesaplanmıştır. Şekil 3.9.a'da laboratuvarda kiriş numunelere uygulanan eğilme deneyi, Şekil 3.9.b'de ise eğilme deneyi sonrası kırılmış kiriş numuneleri gösterilmiştir.

$$fe = \frac{3\,PL}{2bd^2} \qquad (1)$$

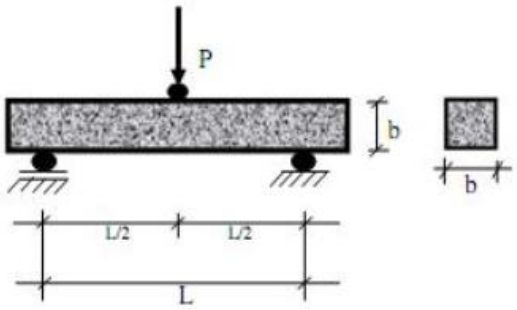
fe: Eğilme dayanımı, (MPa).

P: Kırılmaya neden olan yük, (N).

L: Deney numunesinin mesnetler arasındaki mesafesi, (mm).

b: Deney numunesinin genişliği, (mm).

d: Deney numunesinin kalınlığı, (mm).



Şekil 3.8. Üç nokta eğilme deneyi şematik gösterimi (ASTM C293)



(a) **(b)**

Şekil 3.9. a) Eğilme deney düzeneği, b) Eğilme deneyi sonrasında kırılmış kirişler

3.4.1.3 Silindir yarma deneyi

Silindir numunelere 7., 28. ve 90. günlerde ASTM C496'a uygun olarak yarma deneyi yapılmıştır. Silindir yarma deneyi de eğilmede çekme deneyi gibi betonun çekme mukavemetinin elde edilmesinde kullanılan dolaylı yöntemlerden biridir. Bu deney yönteminde silindir beton örnekleri kullanılmaktadır. Yatay olarak presin tablaları arasına yerleştirilen numune basınç deneylerinde olduğu gibi dik yönde basınç yüklemesi uygulanarak gerçekleştirilmektedir. Yükün arttırılmasıyla, dolaylı olarak

çekme gerilmeleri oluşur ve numune ekseni boyunca yarılarak göçer. Silindir-yarma gerilmesi Denklem 2 kullanılarak hesaplanır. Şekil 3.10.a'da laboratuvarda silindir numunelere uygulanan yarma deneyi, Şekil 3.10.b'de ise yarma deneyi sonrası kırılmış silindir numuneleri gösterilmiştir.

$$\sigma = \frac{2P}{DL} \qquad (2)$$

Bu bağıntıda;

σ: Yarma-Çekme dayanımı, (MPa)

P: Yük (N)

D: Çap (mm)

L: Yükseklik (mm)



(a) **(b)**

Şekil 3.10. a) Yarma deney düzeneği, b) Yarma deneyi sonrasında kırılmış silindir

3.4.2 Dayanıklılık deneyleri

3.4.2.1 Donma-çözülme deneyi

Donma-çözülme deneyi TSE CEN/TR 15177 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Donma-çözülme deneyi için 40x40x160 mm kiriş numuneler üretilmiştir. Numuneler 28. günde üç numunenin ortalaması alınarak ağırlıkları, eğilme ve basınç mukavemetleri belirlenmiştir. TSE CEN/TR 15177 standardına göre donma-çözülme deneyinde numuneler, 18 saat boyunca -20 ^{0}C'de dondurulduktan sonra 30

dakika havada bekletilir. Daha sonra 2 saat boyunca 20 ^{0}C sıcaklıktaki suda çözülmesi beklenir. Bu şekilde bir donma-çözülme döngüsü gerçekleştirilir. Deneysel çalışmalar kapsamında toplam 30 çevrim uygulanmış ve çevrimler sonrasında numunelerin ağırlık, basınç ve eğilme dayanımları belirlenerek donma-çözülme öncesi ve sonrası meydana gelen değişimler incelenmiştir. Şekil 3.11'de donma-çözülme deneyi gösterilmiştir.



Şekil 3.11. Donma-çözülme deneyi

3.4.3 Geçirimlilik deneyleri

Geçirimlilik deneyleri için Ø100×200 mm boyutlu silindir numuneler hazırlanmıştır. Numunelerin hepsi deney gününe kadar 23±2 ^{0}C suda saklanmıştır. Silindir numunelerin geçirimlilik özellikleri 2 farklı test yöntemi ile araştırılmıştır. Bunlar; kılcal su emme deneyi (ASTM C642) ve su emme deneyidir (ASTM C1585).

3.4.3.1 Kılcal su emme deneyi

Kılcal su emme deney yöntemi sadece bir yüzü suya maruz bırakılan numunelerin kılcal boşluklarından suyun kapiler bir şekilde emilimi olarak tanımlanmaktadır. Bu deney için Ø100×200 mm boyutlu silindir numuneler deney

gününe kadar su içerisinde kür koşuluna maruz bırakılmış, deney günü su içerisinden çıkarılan numuneler elmas testere kullanılarak Ø100×50 mm boyutlarında kesilmiştir. Deney metodu ASTM C1585 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiş, kılcal su emme değeri, belirli süreler sonrasında emilen su miktarının (g), suyun özgül ağırlığına (g/mm^3) ve numunenin suya maruz kalan yüzey alanına (mm^2) bölünmesi ile hesaplanmıştır. Denklem 3' te kılcal su emme değeri (I)' nin bulunmasında kullanılan bağıntı verilmiştir.

$$I = \frac{m_t}{a*d} \qquad (3)$$

I : kılcal su emme (mm)

mt : t zamanında numunenin ağırlığındaki değişim (g)

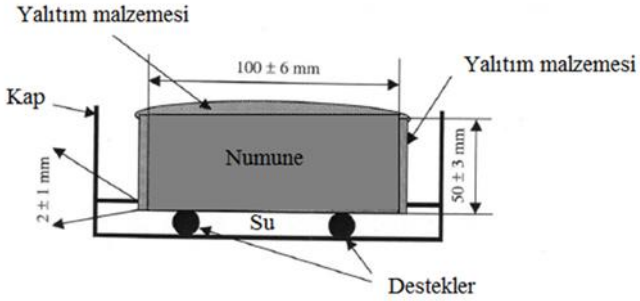
a : numunenin suya maruz kalan yüzey alanı (mm^2)

d : suyun özgül ağırlığı (g/mm^3)

Deney öncesinde numuneler 3 gün süreyle 50 ^{0}C etüv içerisinde bekletilerek kurumaları sağlanmıştır. Etüvden çıkarılan numunelerin suya maruz kalacak yüzeyleri haricinde diğer yüzeyleri silikonla kaplanarak yalıtımlı bir yüzey oluşturulmuş ve deneye hazır hale getirilmiştir (Şekil 3.12). Bu şekilde kuru ağırlıkları bulunan numuneler Şekil 3.13'te gösterilen sembolik deney düzeneği ile kılcal su emme deneyi uygulanmıştır. Numune yüzeyinin suya maruz kalmasından itibaren 1, 2, 3, 4, 6, 8, 12, 16, 20, 25, 36, 49, 64, 81, 120 ve 360. dakikalarda ağırlıklarındaki değişim kaydedilerek bir ölçüm gerçekleştirilmiştir. Numunelerden elde edilen kılcal su emme ölçüm sonuçları zamanın (dakika) karaköküne (√t) bağlı olarak kılcal su emme değerlerindeki değişim (I) eğrileri olarak çizilmiştir.



Şekil 3.12. Numunelerin silikonla kaplanması



Şekil 3.13. Kılcal su emme şematik deney düzeneği (ASTM, C1585)

3.4.3.2 Su emme deneyi

Çalışmada gerçekleştirilen su emme deneyleri ASTM C642 standardına göre yapılmıştır. Su emme deneyinde kılcal su emme deneyinde olduğu gibi Ø100×50 mm boyutlarındaki silindir numuneler kullanılmıştır. Numuneler deney gününe kadar su içerisinde küre bırakılmıştır (Şekil 3.14.a). Deney günü su içerisinden çıkarılan silindir numunelerin tamamen kuru hale gelmesi için 3 gün süre ile 50 0C'de etüvde bekletilmiştir (Şekil 3.14.b). 3 gün sonunda etüvden çıkarılan numuneler terazi yardımıyla tartılarak kuru ağırlıkları (Wk), daha sonra doygun duruma gelmeleri için numuneler su içerisine koyulmuş ve burada en az 2 gün bekletilmiştir. Sonra numuneler sudan çıkarılmış ve yüzeylerindeki kaba su alındıktan sonra hassas terazide tartılmıştır (Ws). Kuru ağırlık ile doymuş ağırlık arasındaki fark, doyma noktasındaki emilen su olarak tanımlanmaktadır. Su emme oranı (Sa) denklem 4 'ten hesaplanmıştır.

$$\text{Su emme oranı Sa (\%)} = \frac{Ws - Wk}{Wk} . 100 \qquad (4)$$



(a) **(b)**

Şekil 3.14. Su Emme Deneyi a) Kür suyu içindeki numuneler
b) Etüv içerisinde kurutulan numuneler

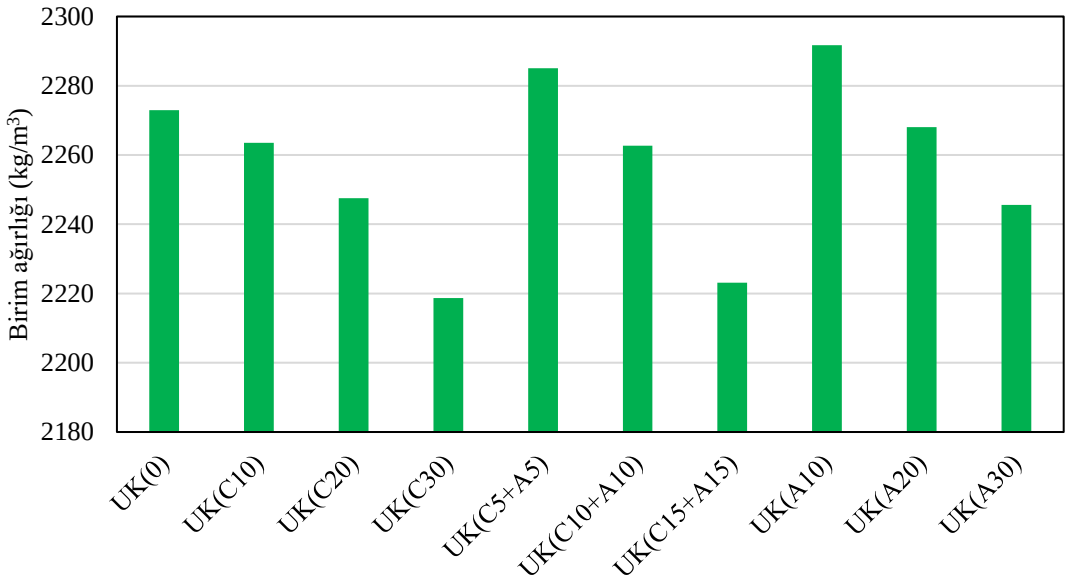
4. DENEY SONUÇLARI

4.1 Birim Ağırlık Deneyi

Birim ağırlık deneyinde, taze karışımlar, 15x15x15 cm^3'lük küp kalıplara doldurulmuş iyice yerleşmesi için vibrasyon uygulanmış ve tartılmıştır. Üretilen taze karışımların deney sonuçları Tablo 4.1'de görülmektedir. Ortalama birim ağırlık değerleri Şekil 4.1'de gösterilmiştir.

Tablo 4.1. Karışımların birim hacim ağırlık değerleri

Karışım	Birim Ağırlık (kg/m3)
UK(0)	2272.95
UK(C10)	2263.54
UK(C20)	2247.54
UK(C30)	2218.67
UK(C5+A5)	2285.10
UK(C10+A10)	2262.70
UK(C15+A15)	2223.17
UK(A10)	2291.73
UK(A20)	2268.03
UK(A30)	2245.63



Şekil 4.1 Ortalama birim hacim ağırlık değerleri

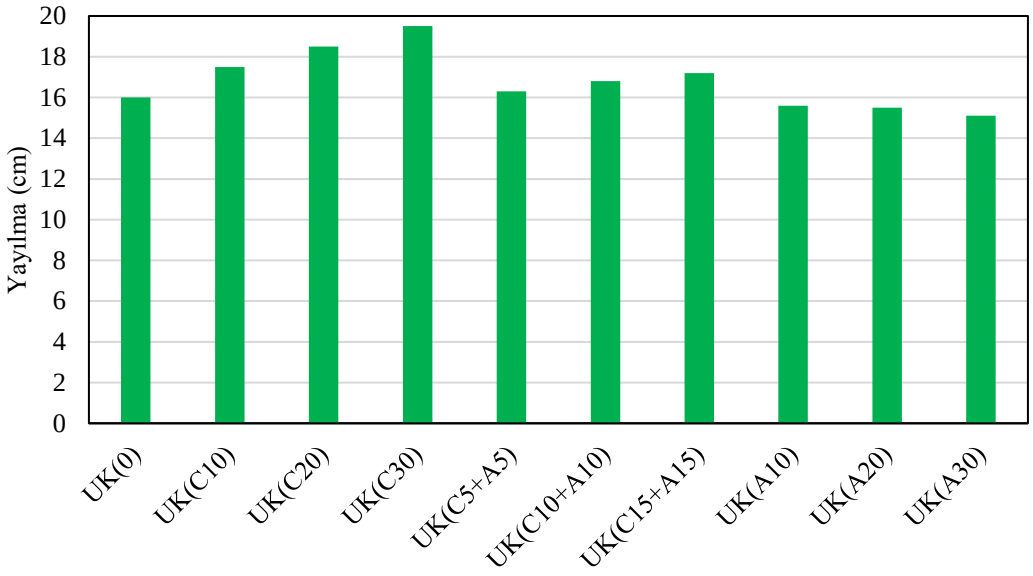
Sonuçlar incelendiğinde numunelerdeki uçucu kül ikame oranı arttıkça birim hacim ağırlık değerlerinin azaldığı görülmüştür. Bunun nedeni F tipi uçucu külün özgül ağırlığının çimentoya göre düşük olmasıdır. Bu artış ve azalmalar F tipi uçucu küllerin incelik, tane büyüklüğü, tane şekli gibi bazı fiziksel ve kimyasal özelliklerine bağlıdır. İlave yöntemi ile hazırlanan karışımların birim ağırlık değerleri diğer karışım yöntemlerine göre daha yüksek çıkmıştır. Bunun nedeni, uçucu külün boşlukları kumdan daha iyi doldurmasıdır.

4.2 Yayılma Deneyi

Tüm taze karışımlar için yayılma değerleri belirlenmiş ve yayılma deneyinin sonuçları Tablo 4.2'de gösterilmektedir. Ortalama yayılma değerleri Şekil 4.2'de gösterilmiştir.

Tablo 4.2. Karışımların yayılma değerleri

Karışım	Yayılma (cm)
UK(0)	16.0
UK(C10)	17.5
UK(C20)	18.5
UK(C30)	19.5
UK(C5+A5)	16.3
UK(C10+A10)	16.8
UK(C15+A15)	17.2
UK(A10)	15.6
UK(A20)	15.5
UK(A30)	15.1



Şekil 4.2. Ortalama yayılma değerleri

Uçucu külün betonun işlenebilirliği üzerindeki etkisini anlamak için su içeriği bütün karışımlar için sabit olacak şekilde ayarlanmıştır. Basit ikame ve kısmi ikame yönteminde yayılma deney sonuçları incelendiğinde, uçucu kül oranı arttıkça karışım yayılması artmıştır. İlave yönteminin sonuçlarında ise, uçucu kül oranı arttıkça karışım yayılması azalmıştır. Bunun nedeni ilave yönteminde, karışımdaki çimento miktarı değiştirilmeden karışıma uçucu kül ilave edilmiş ve karışımdaki bağlayıcı madde miktarı yükselmiştir. Bu şekilde ilave yönteminde betonun su ihtiyacı yükselmektedir.

Ayrıca, Şekil 4.2'de, çimento'nun uçucu kül ikamesi ile oluşturulan karışımların, ince agreganın uçucu kül ikamesi ile oluşturulan karışımlara göre daha işlenebilir olduğu fark edilmektedir. Bu nedenle, beton içerisindeki suyun azaltılması ve bağlayıcı miktarının artırılması, işlenebilirliğin sabit tutulması açısından önemlidir. F tipi uçucu küllerin de işlenebilirliğe katkısı bu açıdan olumlu yönde olmaktadır.

Yukarıdaki sonuçlardan, uçucu küllerin betonda işlenebilirliği iyileştirdiği söylenebilir. Çünkü uçucu külün fiziksel özellikleri, inceliği, kimyasal ve minerolojik bileşimi bu noktada önemli bir rol oynamıştır.

4.3 Basınç Deneyi

Basınç deneyi 50x50x50 mm küp numunelerde 7., 28. ve 90. günlerde yapılmış ve elde edilen sonuçlar Tablo 4.3'te verilmiştir.

Tablo 4.3. Numunelerin 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları

Karışım Kodu	Basınç Dayanımı (MPa)		
	7 günlük	28 günlük	90 günlük
UK(0)	29.88	47.54	55.75
UK(C10)	22.61	44.52	52.01
UK(C20)	16.71	41.39	50.33
UK(C30)	15.61	27.54	49.21
UK(C5+A5)	27.00	50.90	70.18
UK(C10+A10)	23.58	46.48	64.61
UK(C15+A15)	19.61	45.15	60.79
UK(A10)	25.65	54.64	74.37
UK(A20)	21.88	51.47	72.04
UK(A30)	18.82	45.77	69.97

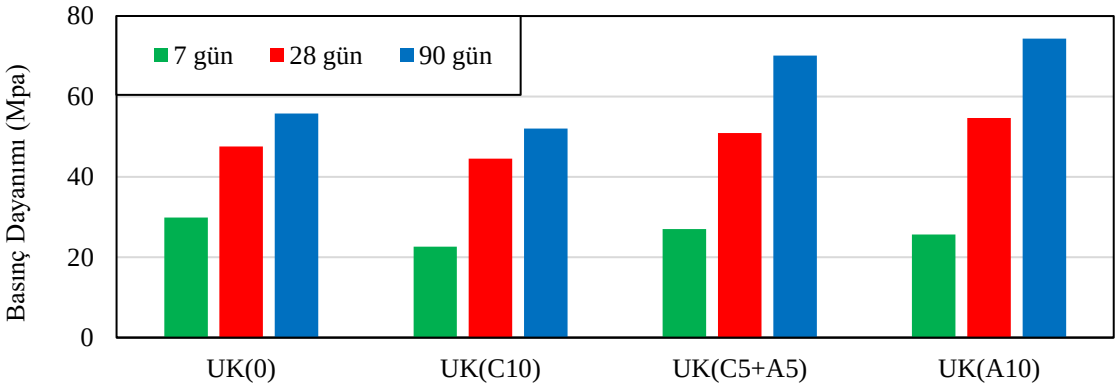
Tablo 4.3 incelendiğinde uçucu kül oranının artışına bağlı olarak basınç dayanımının azaldığı görülmektedir.

Basit ikame yönteminde referans numuneler UK(0)'a göre basınç dayanımındaki maksimum düşüş oranı %30 uçucu kül içeren UK(C30) numunelerinde %12, minimum azalma ise %10 uçucu kül içeren UK(C10) numunelerinde %7 olmuştur.

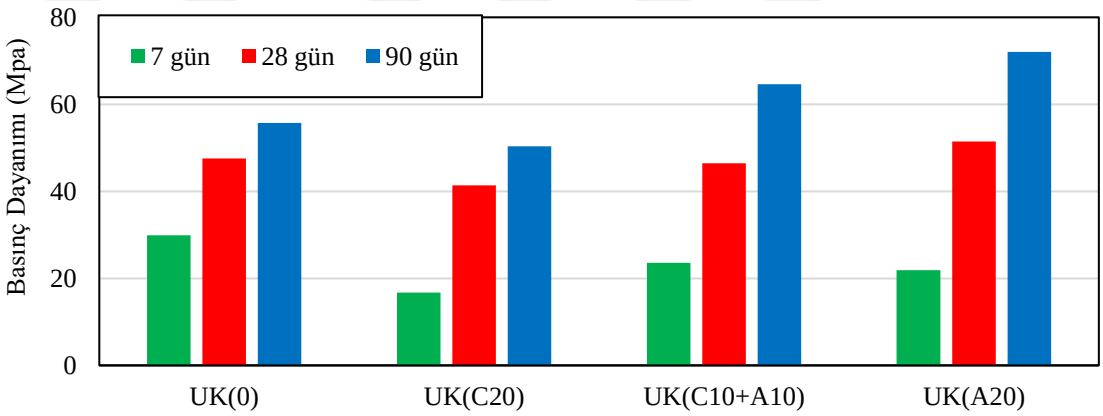
Kısmi ikame yönteminde referans numuneler UK(0)'a göre basınç dayanımındaki maksimum artış oranı %10 uçucu kül içeren UK(C5+A5) numunelerinde %26, minimum artma ise %30 uçucu kül içeren UK(C15+A15) numunelerinde %9 olmuştur. Benzer şekilde ilave yönteminde referans numuneler UK(0)'a göre maksimum artış oranı UK(A10) numunelerinde %33, minimum artış oranı ise UK(A30) numunelerinde %25 olmuştur.

Şekil 4.3'te farklı yöntemlere göre eşit oranda UK(%10) içeren numunelerin basınç dayanımlarının karşılaştırılması, Şekil 4.4'te farklı yöntemlere göre eşit oranda UK(%20) içeren numunelerin basınç dayanımlarının karşılaştırılması, Şekil 4.5'te ise farklı yöntemlere göre eşit oranda UK(%30) içeren numunelerin basınç dayanımlarının karşılaştırılmasına ait grafikler verilmiştir.

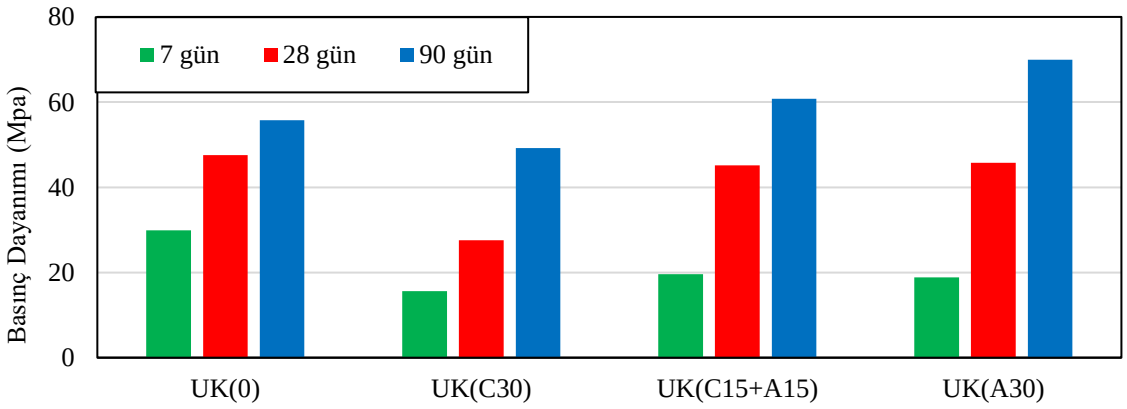
Şekil 4.6'da bütün numunelerin basınç dayanımlarının karşılaştırılması toplu olarak verilmiştir.



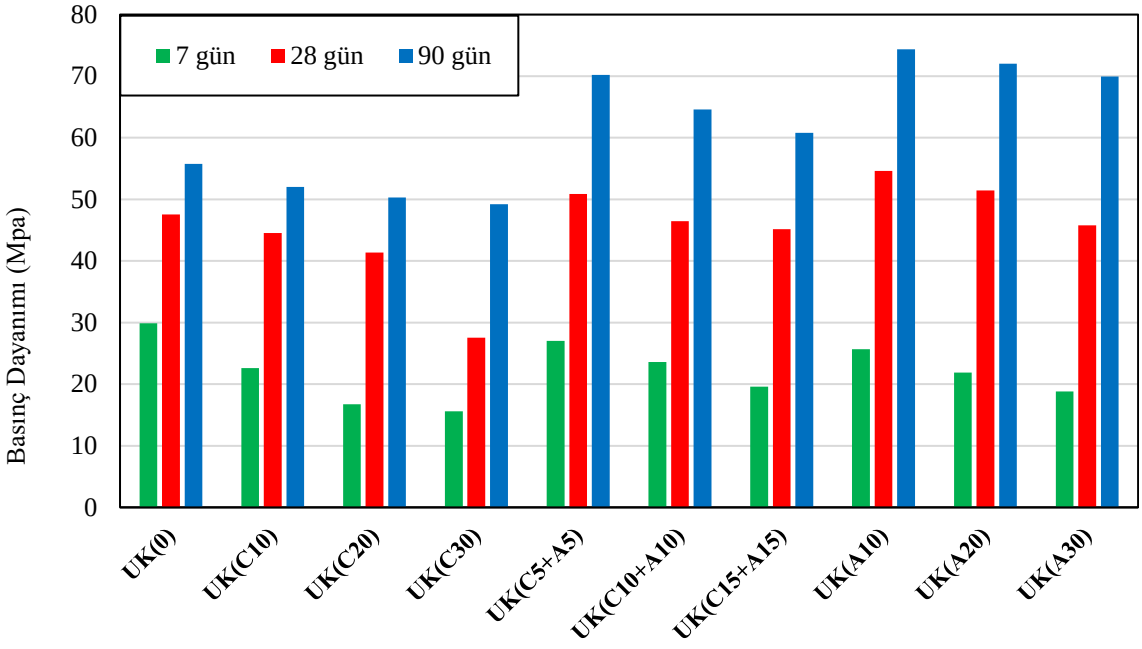
Şekil 4.3. Farklı yöntemlere göre %10 UKiçeren numunelerin basınç dayanımlarının karşılaştırılması



Şekil 4.4. Farklı yöntemlere göre %20UK içeren numunelerin basınç dayanımlarının karşılaştırılması



Şekil 4.5. Farklı yöntemlere göre %30 UKiçeren numunelerin basınç dayanımlarının karşılaştırılması



Şekil 4.6. Bütün numunelerin basınç dayanımlarının karşılaştırılması

Şekil 4.3-4.6 incelendiğinde basınç deneyleri neticesinde elde edilen sonuçlar maddeler halinde verilmiştir. Bunlar;

- Farklı yaşlarda %10 uçucu kül içeren karışımların bütün uçucu kül karışımları arasında en yüksek basınç dayanımına sahip olduğu görülmüştür. Bir karışımdaki uçucu kül oranı %10'un üzerine çıktıkça basınç dayanımının azaldığı açıktır. Mevcut literatür çalışmaları incelendiğinde, benzer şekilde betonda fazla miktarda uçucu kül kullanımının betonun mekanik özelliklerini düşürdüğü görülmektedir.

- Bütün karışımlarda ilerleyen yaşlarda basınç dayanımında artışlar gözlemlenmiştir. Fakat özellikle kısmi ikame ve ilave yöntemlerinde hazırlanan numunelerin 90 günlük basınç dayanımlarındaki artış oldukça belirgindir. Bu iki yöntemde karşımlardan çıkarılan çimento miktarı basit ikame yöntemlerine göre daha azdır. Fakat bununla birlikte agrega yerine de uçucu kül kullanılmış olması karışım içerisindeki bağlayıcı miktarının artmasına sebep olmuştur. Uçucu külün puzolanik karakteri sayesinde hidratasyon olayının uzun süreli devam etmesi ilerleyen yaşlarda dayanımlarda artışa sebep olmuştur.

- 7 günlük deney sonuçlarına göre, uçucu kül içermeyen referans numunelerin basınç dayanımı uçucu kül içeren numunelere göre daha yüksek elde edilmiştir. Bununla birlikte, kısmi ikame yöntemi diğer yöntemlerden daha yüksek sonuçlar vermiştir. Bunun nedeni, bu yöntemde karışımdan çıkarılan çimentonun ağırlığı basit ikame yöntemine göre ve uçucu kül miktarı ilave yöntemine göre daha azdır.

- 28. ve 90. günlerde, ilave yöntemi ile hazırlanan numunelerin basınç dayanımları diğer yöntemlere göre hazırlanan numunelere göre daha yüksek sonuçlar vermiştir. Bu durum, bu yöntemde uçucu kül miktarının diğer yöntemlere göre fazla olması nedeniyle ilerleyen yaşlarda puzolanik aktivitenin basınç dayanımı üzerinde olumlu katkısı olmasıyla açıklanabilir.

- Karışımların, 7, 28 ve 90 günlük kür süreleri sonrasında elde edilen dayanım değerleri karşılaştırıldığında en yüksek dayanım değerlerinin UK(A10) karışımından elde edildiği görülmektedir.

- Üç farklı yöntem kullanılarak hazırlanan karışımların basınç dayanımlarına bakıldığı zaman, uçucu kül miktarının artmasıyla basınç dayanımları düşmüştür. Fakat elde edilen dayanımlar pratikte olması beklenen dayanımların altında değildir.

4.4 Eğilme Deneyi

Eğilme deneyi 40x40x160 mm kiriş numunelerde 7., 28. ve 90. günlerde yapılmış, sonuçlar Tablo 4.4'te verilmiştir.

Tablo 4.4. Numunelerin 7., 28 ve 90 günlük eğilme dayanımları

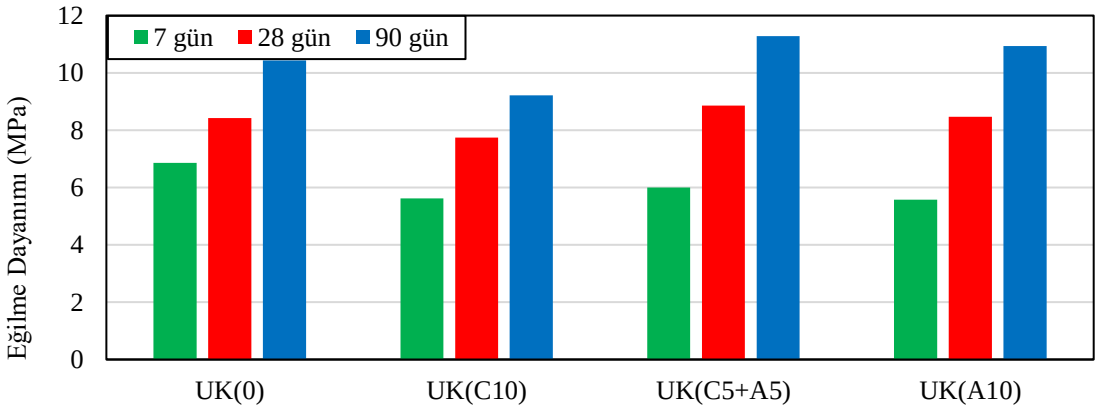
Karışım Kodu	**Eğilme Dayanımı (MPa)**		
	7günlük	**28günlük**	**90günlük**
UK(0)	6.86	8.42	10.43
UK(C10)	5.62	7.74	9.22
UK(C20)	4.57	7.54	10.27
UK(C30)	4.06	7.33	9.79
UK(C5+A5)	6.00	8.86	11.28
UK(C10+A10)	4.82	7.55	10.63
UK(C15+A15)	4.53	7.36	12.15
UK(A10)	5.58	8.47	10.93
UK(A20)	5.36	7.46	10.90
UK(A30)	5.04	6.77	10.68

Tablo 4.4 incelendiğinde uçucu kül oranın artıkça eğilme dayanımının azaldığı görülmektedir. Basit ikame yönteminde referans numunelere göre eğilme dayanımındaki maksimum azalma UK(C10) numunelerinde (%12), minimum azalma ise UK(C20) numunelerinde (%2) olmuştur.

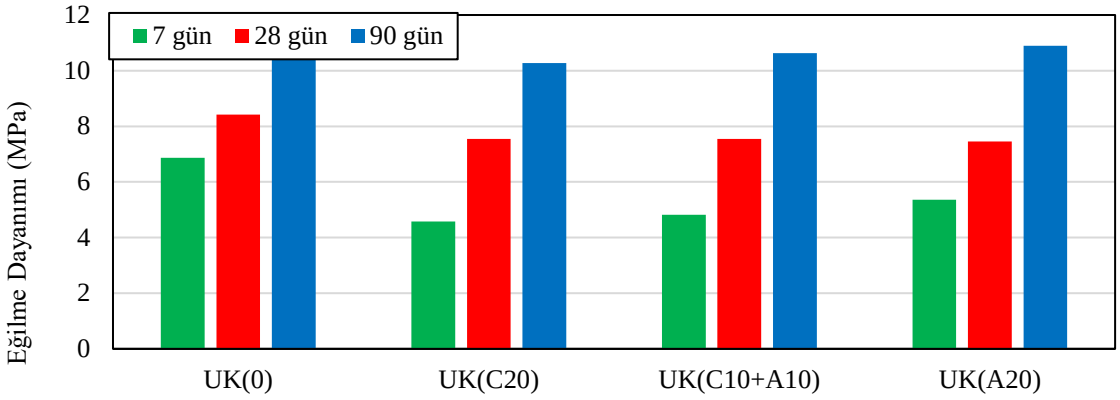
Kısmi ikame yönteminde referans numunelere göre eğilme dayanımındaki maksimum artış oranı UK(C15+A15) numunelerinde (%17), minimum artış ise UK(C10+A10) numunelerinde (%2) olmuştur.

Benzer şekilde ilave yönteminde referans numunelere göre maksimum artış oranı UK(A10) numunelerinde (%5), minimum artış oranı ise UK(A30) numunelerinde (%2) olmuştur.

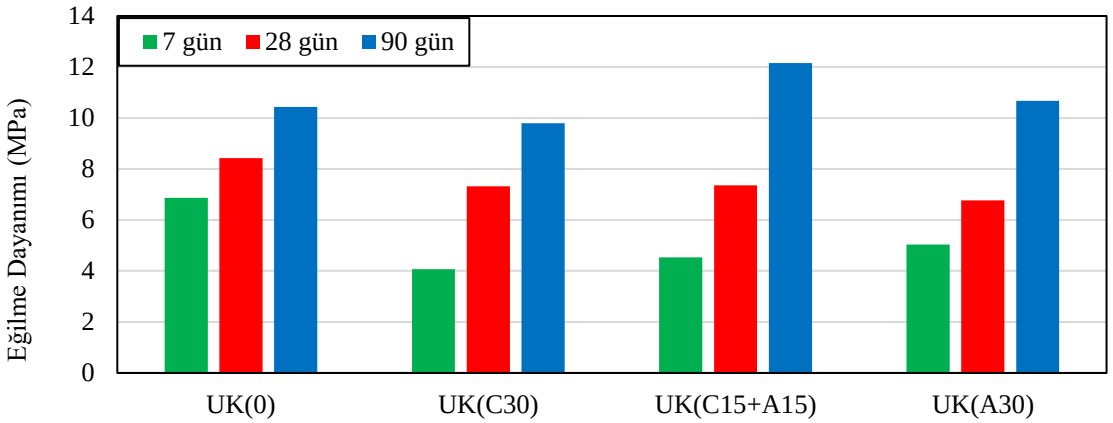
Şekil 4.7'de farklı yöntemlere göre eşit oranda UK(%10) içeren numunelerin eğilme dayanımlarının karşılaştırılması, Şekil 4.8'de farklı yöntemlere göre eşit oranda UK(%20) içeren numunelerin eğilme dayanımlarının karşılaştırılması, Şekil 4.9'da ise farklı yöntemlere göre eşit oranda UK(%30) içeren numunelerin eğilme dayanımlarının karşılaştırılmasına ait grafikler verilmiştir. Şekil 4.10'da bütün numunelerin eğilme dayanımlarının karşılaştırılması toplu olarak verilmiştir.



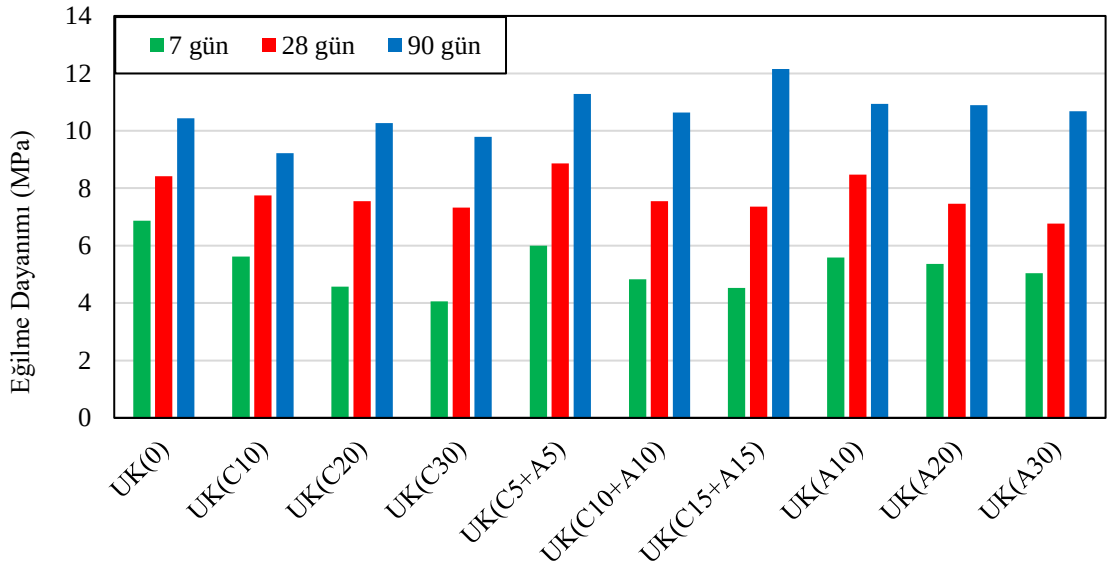
Şekil 4.7. Farklı yöntemlere göre %10 UKiçeren numunelerin eğilme dayanımlarının karşılaştırılması



Şekil 4.8. Farklı yöntemlere göre %20 UK içeren numunelerin eğilme dayanımlarının karşılaştırılması



Şekil 4.9. Farklı yöntemlere göre %30 UK içeren numunelerin eğilme dayanımlarının karşılaştırılması



Şekil 4.10. Bütün numunelerin eğilme dayanımlarının karşılaştırılması

Şekil 4.7-4.10 incelendiğinde eğilme deneyleri neticesinde elde edilen sonuçlar maddeler halinde verilmiştir. Bunlar;

- Farklı karışım yöntemelerine göre hazırlanan numunelerin 7 ve 28 günlük eğilme deneyleri sonuçları incelendiğinde, uçucu kül oranı arttıkça referans numuneye göre eğilme dayanımı değerlerinin azaldığı, ancak 90 günlük numunelerden elde edilen dayanım değerlerinin bazı numunelerde referans numuneye yakın, bazılarında ise daha yüksek değerler aldığı görülmüştür. 90 günlük deney sonuçlarına göre en düşük eğilme dayanımı basit ikame yöntemi ile hazırlanan UK(C20), en yüksek eğilme dayanımı ise kısmi ikame yöntemi ile hazırlanan UK(C15+A15) numunelerinden elde edilmiştir.

- Artan uçucu kül oranlarında basit ikame yöntemi ile hazırlanan numunelerin, farklı yaşlardaki eğilme dayanımı referans numunelerden elde edilen değerlere göre daha düşük çıkmıştır. Kısmi ikame yöntemi ve ilave yöntemi ile hazırlanan numunelerde ise sadece 7 günlük eğilme dayanım değerleri referans numunlere göre daha düşük çıkmış, 28 ve 90 günlük dayanım değerleri ise genelde referans numuneye göre daha yüksek elde edilmiştir. Bu sonuca göre uçucu külün sadece çimento ile ikame edilmesi eğilme dayanım değerlerini düşürmekte, çimento ve agrega ile kısmı ikamesi ya da sadece agrega ile ikamesi ilerleyen yaşlarda eğilme dayanımlarında artışa sebep olmaktadır.

- İlerleyen yaşlarda uçucu kül katkılı numunelerin eğilme dayanımlarındaki artışın, basınç dayanımlarındaki artıştan daha az olduğu görülmüştür. 90 gün sonunda eğilme dayanımdaki artış en fazla %17, basınç dayanımdaki artış ise %33 olmuştur.

4.5 Silindir Yarma Deneyi

Silindir yarma deneyi Ø100×200 mm boyutlu silindir numunelerde 7., 28. ve 90. günlerde yapılmış, sonuçlar Tablo 4.5’te verilmiştir.

Tablo 4.5. Numunelerin 7, 28 ve 90 günlük silindir yarma dayanımları

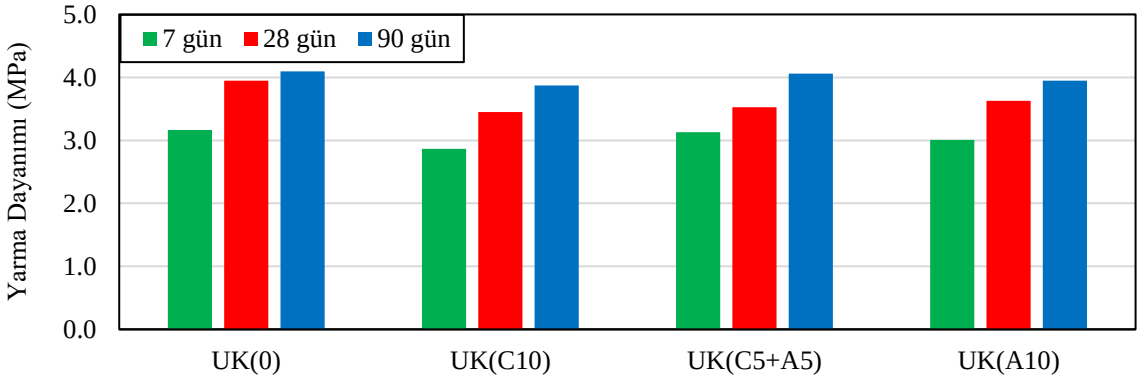
Karışım Kodu	Yarma Dayanımı (MPa)		
	7 günlük	28 günlük	90 günlük
UK(0)	3.17	3.95	4.10
UK(C10)	2.87	3.45	3.87
UK(C20)	2.56	3.15	3.49
UK(C30)	1.65	2.85	3.28
UK(C5+A5)	3.13	3.53	4.06
UK(C10+A10)	2.76	3.22	3.66
UK(C15+A15)	2.18	3.00	4.21
UK(A10)	3.01	3.63	3.95
UK(A20)	2.68	3.35	3.59
UK(A30)	1.81	3.10	3.36

Tablo 4.5 incelendiğinde uçucu kül oranın artıkça yarma dayanımı azaldığı görülmektedir. Basit ikame yönteminde referans numunelere UK(0) göre yarma dayanımındaki maksimum düşüş oranı %30 uçucu kül içeren UK(C30) numunelerinde (%20), minimum azalma ise %10 uçucu kül içeren UK(C10) numunelerinde (%5) olmuştur.

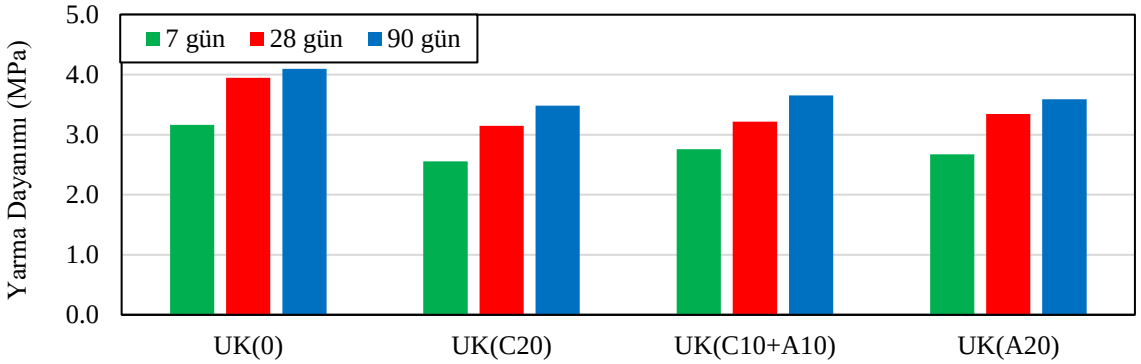
Kısmi ikame yönteminde referans numunelere UK(0) göre yarma dayanımındaki maksimum artış oranı %30 uçucu kül içeren UK(C15+A15) numunelerinde (%3), maksimum azalma ise %20 uçucu kül içeren UK(C10+A10) numunelerinde (%11) olmuştur.

Benzer şekilde ilave yönteminde referans numunelere UK(0) göre maksimum düşüş oranı UK(A30) numunelerinde (%18), minimum düşüş oranı ise UK(A10) numunelerinde (%4) olmuştur.

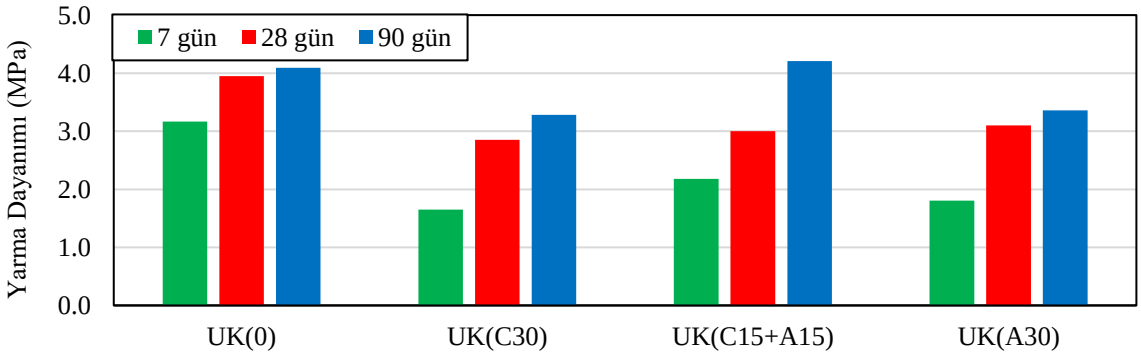
Şekil 4.11'de farklı yöntemlere göre eşit oranda UK(%10) içeren numunelerin yarma dayanımlarının karşılaştırılması, Şekil 4.12'de farklı yöntemlere göre eşit oranda UK(%20) içeren numunelerin yarma dayanımlarının karşılaştırılması, Şekil 4.13'te ise farklı yöntemlere göre eşit oranda UK(%30) içeren numunelerin yarma dayanımlarının karşılaştırılmasına ait grafikler verilmiştir. Şekil 4.14'te bütün numunelerin yarma dayanımlarının karşılaştırılması toplu olarak verilmiştir.



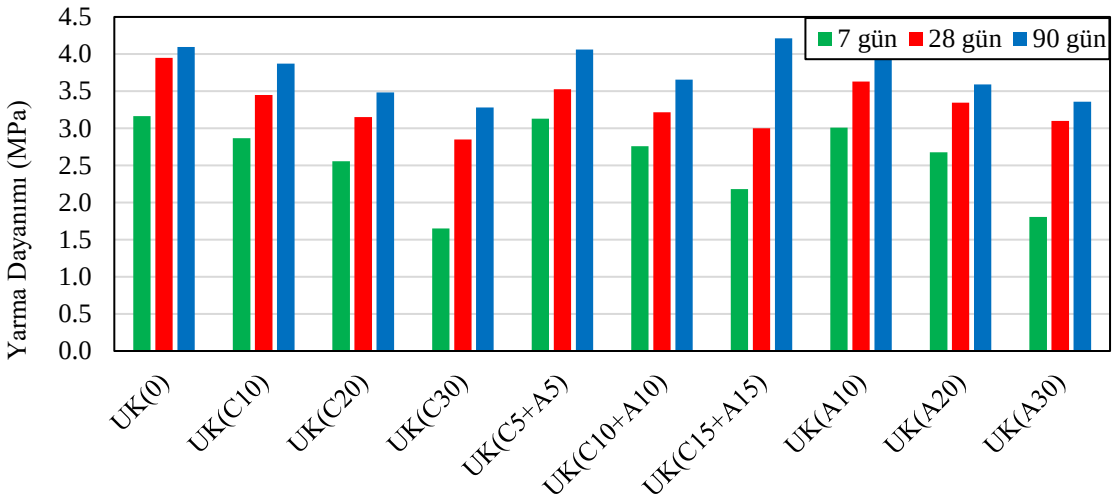
Şekil 4.11. Farklı yöntemlere göre %10 UK içeren numunelerin yarma dayanımlarının karşılaştırılması



Şekil 4.12. Farklı yöntemlere göre %20 UK içeren numunelerin yarma dayanımlarının karşılaştırılması



Şekil 4.13. Farklı yöntemlere göre %30 UK içeren numunelerin yarma dayanımlarının karşılaştırılması



Şekil 4.14. Bütün numunelerin yarma dayanımlarının karşılaştırılması

Şekil 4.11-4.14 incelendiğinde silindir yarma deneyleri neticesinde elde edilen sonuçlar maddeler halinde verilmiştir. Bunlar;

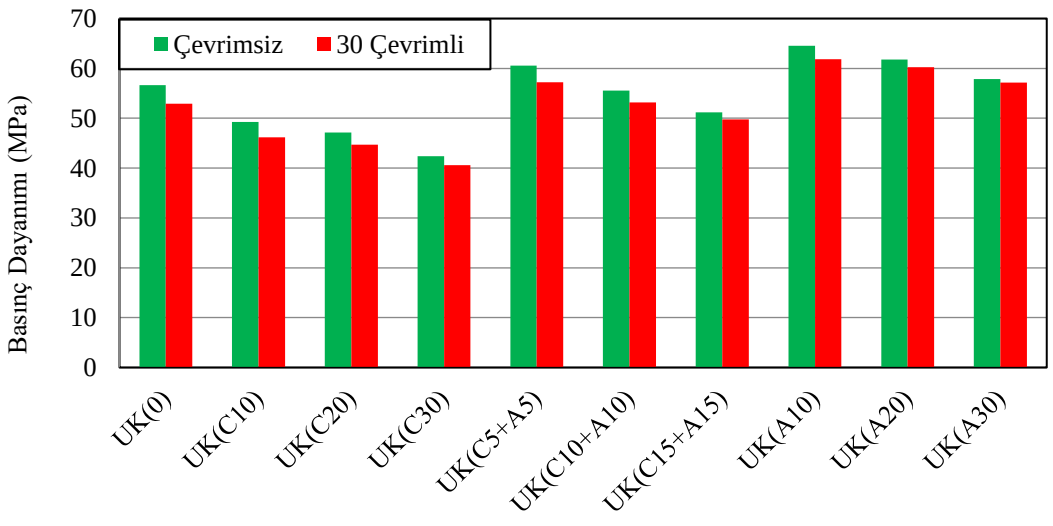
- Uçucu kül katkılı karışımlarda silindir numuneler üzerinde yapılan yarmada çekme dayanımı deney sonuçlarına göre, uçucu kül oranı arttıkça yarma dayanımı değerlerinin azaldığı görülmüştür.
- Tüm karışımlar için numune yaşına bağlı olarak yarma dayanımı değerlerinin arttığı görülmüştür.
- Tüm karışımların sonuçları kontrol karışımlarının sonuçlarından daha azdır, sadece UK(C15+A15) karışımı 90 günlük sonuçlarında daha büyük olduğu göstermiştir.
- Eğilme sonuçlarında gösterdiği gibi tüm numune yaşlarında UK(C15+A15) karışımı en yüksek, UK(C30) karışımı en düşük sonucu vermiştir.
- 7 ve 90 günlük sonuçlarında, kısmi ikame yöntemi, diğer yöntemlerden daha büyük sonuçlar vermiştir. 28 günlük sonuçlarında ise ilave yöntemi büyük sonuçlar vermiştir.
- Sonuçların çoğu birbirlerine yakın değerlerde ve zaman içerisinde yarma dayanımlarındaki artışın daha az olduğu görülmüştür.

4.6 Donma-Çözülme Deneyi

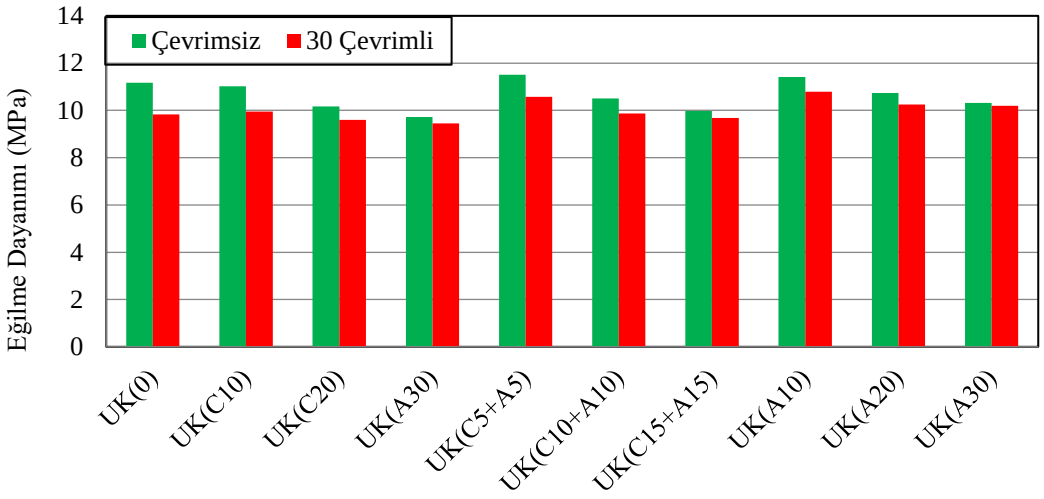
F tipi uçucu kül ikameli ve kontrol numunelerine ait Donma-Çözülme (D-Ç) çevrimi uygulanmış numuneleri ve standart kürde saklanan karşılaştırma numunelerinin basınç ve eğilme dayanımı sonuçları Tablo 4.6'da verilmiştir. (D-Ç) çevrimi uygulanmış numunelerin basınç ve eğilme dayanımları Şekil 4.15-4.16'da gösterilmiştir. (D-Ç) uygulanmış numunelerin ağırlık kayıpları Şekil 4.17'de görülmüştür.

Tablo 4.6. Donma-Çözülme dayanım kayıpları

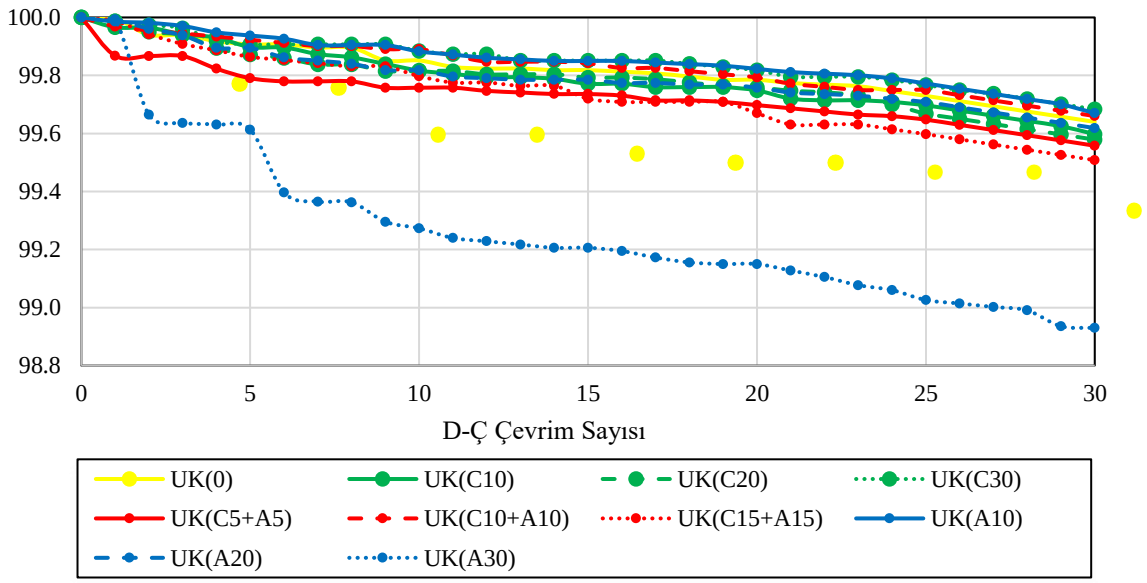
Karşım Kodu	Çevrimsiz		30 Çevrimli		Dayanım Kayıpları	
	Basınç (MPa)	Eğilme (MPa)	Basınç (MPa)	Eğilme (MPa)	Basınç (%)	Eğilme (%)
UK(0)	56.65	11.16	52.93	9.83	7	12
UK(C10)	49.27	11.01	46.20	9.95	6	10
UK(C20)	47.16	10.17	44.70	9.60	5	6
UK(C30)	42.38	9.72	40.59	9.44	4	3
UK(C5+A5)	60.54	11.50	57.20	10.58	6	8
UK(C10+A10)	55.55	10.50	53.17	9.86	4	6
UK(C15+A15)	51.17	9.98	49.80	9.68	3	3
UK(A10)	64.51	11.41	61.81	10.79	4	5
UK(A20)	61.76	10.73	60.26	10.25	2	4
UK(A30)	57.87	10.31	57.16	10.20	1	1



Şekil 4.15. Donma-çözülme uygulanmış numunelerin basınç dayanımlarının karşılaştırılması



Şekil 4.16. Donma-çözülme uygulanmış numunelerin eğilme dayanımlarının karşılaştırılması



Şekil 4.17. Donma çözülme ağırlık kayıpları

Tablo 4.6'da incelendiğinde mekanik deneylere benzer şekilde, uçucu kül miktarı arttıkça basınç ve eğilme dayanım değerlerinin azaldığı görülmektedir. Fakat numunelerin dayanım kayıplarındaki yüzdesel değişimlere bakıldığında uçucu kül içermeyen referans numunelerin dayanımlarındaki azalmanın, uçucu kül içeren numunelerin dayanımlarındaki azalmadan daha fazla olduğu görülmektedir. Buna göre uçucu kül oranı arttıkça numunelerin donma çözülmeye karşı olan direncinin artmakta olduğu söylenebilir. Bu durum, uçucu küllerin numune içerisindeki boşlukları daha iyi doldurarak donma-çözülme dayanıklılığını arttırması ile açıklanabilir. Örneğin %10,

%20 ve %30 uçucu kül içeren numunelerin donma çözülme sonrası basınç dayanımları açısından kayıplarının sırasıyla yaklaşık %4, %2 ve %1 oranlarında oldukları görülmüştür. Referans numunenin donma çözülme çevrimleri sonucunda ise dayanım kaybı yaklaşık %7 olmuştur. İlave yöntemi, basınç ve eğilme dayanımlarında daha az kayıp göstermiştir. Ayrıca, bütün numunelerde donma çözülme çevrimleri sonrasında önemli oranda ağırlık kayıpları görülmemiştir. En yüksek ağırlık kaybı UK(A30) karışımında görülmüştür.

4.7 Su Emme Deneyi

Su emme deneyi Ø100×50 mm boyutlu silindir numunelerde 7., 28. ve 90. günlerde yapılmış ve sonuçlar Tablo 4.7'de verilmiştir.

Tablo 4.7. Numunelerin 7, 28 ve 90 günlük su emme (%) sunuçları

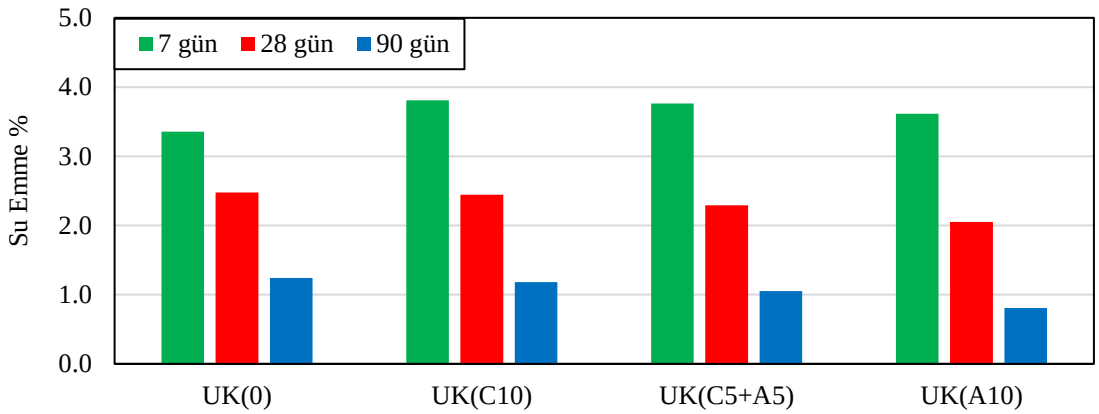
Karışım Kodu	Su Emme %		
	7 günlük	28 günlük	90 günlük
UK(0)	3.35	2.48	1.24
UK(C10)	3.81	2.44	1.18
UK(C20)	5.04	3.04	1.20
UK(C30)	6.04	3.51	1.45
UK(C5+A5)	3.76	2.29	1.05
UK(C10+A10)	4.60	2.60	1.07
UK(C15+A15)	4.95	2.77	1.08
UK(A10)	3.61	2.05	0.81
UK(A20)	4.58	2.06	0.91
UK(A30)	4.70	2.21	1.05

Tablo 4.7 incelendiğinde farklı karışım yöntemlerinde uçucu kül oranı artıkça su emme oranının arttığı görülmektedir. Fakat bu azalma oranı 7 günlük testlerde belirgin olmakla birlikte, ilerleyen yaşlarda giderek düşmüştür. Bu durum tane yüzey alanı çimento ve agragaya göre fazla olan uçucu külün puzolanik özelliğine bağlı olarak ilk günlerde suyu daha fazla emmesi, ilerleyen yaşlarda hidratasyon sürecinin seyrine parallel olarak bağlayıcılık özelliği kazanması ile açıklanabilir. Referans numunelere gore maksimum azalma oranı, basit ikame yönteminde %20 uçucu kül içeren UK(C20) numunelerinde %4, maksimum artış ise %30 uçucu kül içeren UK(C30) numunelerinde %17 olmuştur.

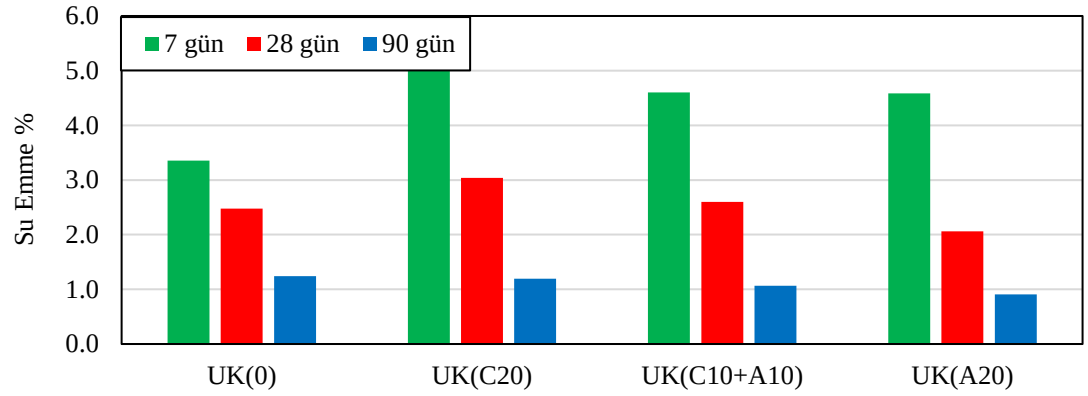
Kısmi ikame yönteminde UK(C5+A5) numunelerinde referans numunelere göre su emmedeki maksimumazalma%15, minimum azalma ise UK(C15+A15) numunelerinde %13 olmuştur.

Benzer şekilde ilave yönteminde UK(A10) numunelerinde referans numunelere göre maksimum azalma oranı %35, minimum azalma oranı ise UK(A30) numunelerinde %16 olmuştur.

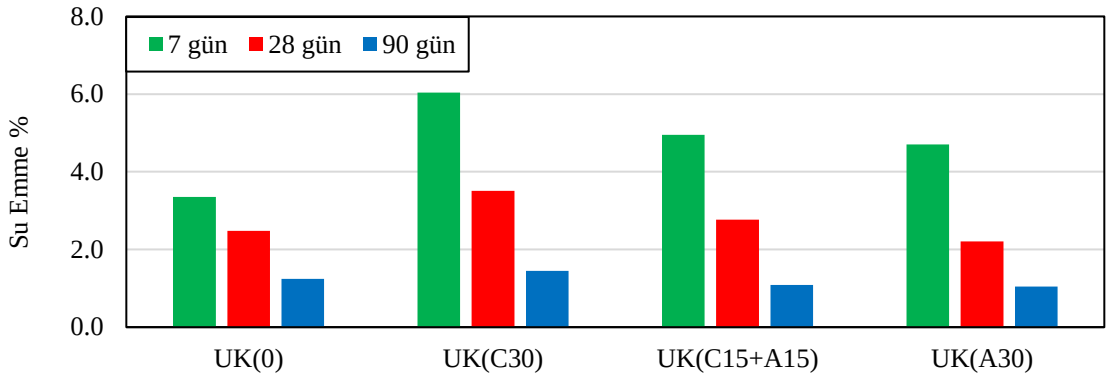
Şekil 4.18'de farklı yöntemlere göre eşit oranda UK(%10) içeren numunelerin su emme değerlerini karşılaştırılması, Şekil 4.19'da farklı yöntemlere göre eşit oranda UK(%20) içeren numunelerin su emme değerlerini karşılaştırılması, Şekil 4.20'de ise farklı yöntemlere göre eşit oranda UK(%30) içeren numunelerin su emme değerlerini karşılaştırılmasına ait grafikler verilmiştir. Şekil 4.21'de bütün numunelerin su emme değerlerinin karşılaştırılması toplu olarak verilmiştir.



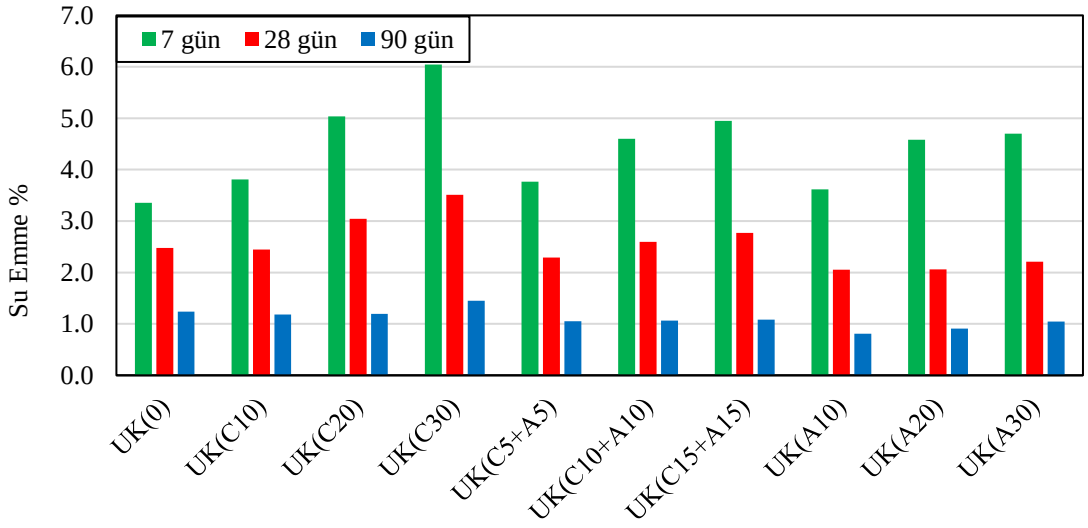
Şekil 4.18. Farklı yöntemlere göre %10 UK içeren numunelerin su emme değerlerini karşılaştırılması



Şekil 4.19. Farklı yöntemlere göre %20 UK içeren numunelerin su emme değerlerini karşılaştırılması



Şekil 4.20. Farklı yöntemlere göre %30 UK içeren numunelerin su emme değerlerini karşılaştırılması



Şekil 4.21. Bütün numunelerin su emme değerlerini karşılaştırılması

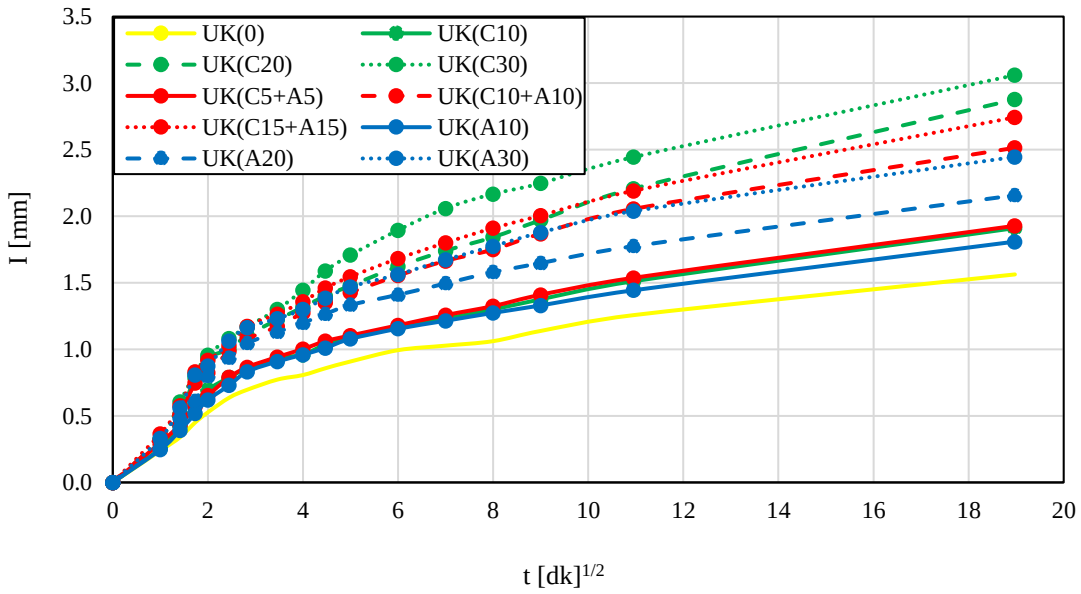
Şekil 4.18-4.21 incelendiğinde su emme deneyleri neticesinde elde edilen sonuçlar maddeler halinde verilmiştir. Bunlar;

- Uçucu kül ikame miktarı arttıkça numunelerdeki su emme miktarlarının da arttığı görülmektedir. 28 ve 90 günlük kür süresinden sonra su emme değerlerinin giderek azaldığı gözlemlenmiştir. Bu durum, numunelerin kür süresince boşluk yapılarının azaldığını göstermektedir. İlerleyen kür süreleri boyunca uçucu küller $Ca(OH)_2$ ile birleşerek oluşturdukları C-S-H jelleriyle geçirimliliği de azaltmış olurlar.
- 7 günlük numunelerin su emme sonuçlarında, kontrol numunesinin su emme değeri, diğer karışımlar arasında en düşük sonuç olarak bulunmuştur.
- Farklı yaşlarda tekrarlanan deneylerde, en düşük su emme oranı UK(A10), en yüksek su emme oranı ise UK(C30) numunelerinden elde edilmiştir.

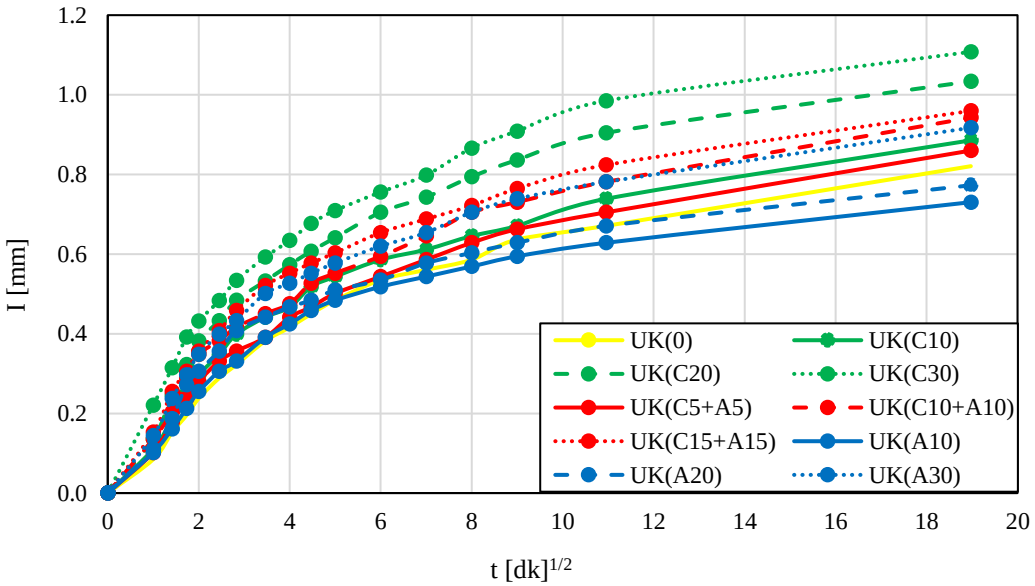
- UK(A10), UK(A20) ve UK(A30) numunelerinin farklı yaşlardaki su emme değerleri genel olarak diğer numunelerin sonuçlarına göre en düşük değerler almıştır. UK(C10), UK(C20) ve UK(C30) numunelerinin su emme değerleri ise diğer numunelere göre en yüksek değerler aldığı görülmüştür. Buna göre uçucu külün çimento yerine agrega ile yer değiştirmesinin, numunelerin boşluk miktarlarının azalması yönünden olumlu etkiye sahip olduğu anlaşılmaktadır.

4.8 Kılcal Su Emme Deneyi

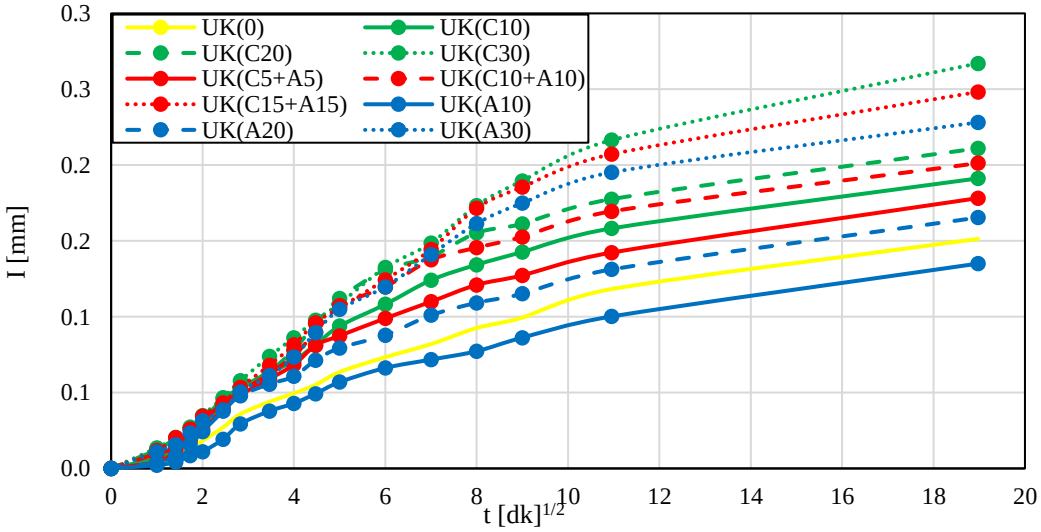
Kılcal su emme deneyleri Ø100×50 mm boyutlu silindir numunelerde 7., 28. ve 90. günde yapılmış, sonuçlar Şekil 4.22-4.24'te gösterilmiştir.



Şekil 4.22. 7 günlük bütün numunelerin kılcal su emme değerlerinin karşılaştırılması



Şekil 4.23. 28 günlük bütün numunelerin kılcal su emme değerlerinin karşılaştırılması



Şekil 4.24. 90 günlük bütün numunelerin kılcal su emme değerlerinin karşılaştırılması

Şekil 4.22-4.24 incelendiğinde kılcal su emme deneyleri neticesinde elde edilen sonuçlar maddeler halinde verilmiştir. Bunlar;

- Su emme deneylerine benzer şekilde, özellikle 7 günlük deney sonuçlarına göre uçucu kül miktarı arttıkça kılcal su emme sonuçlarının arttığı fakat ilerleyen yaşlarda bu artışın giderek azaldığı görülmüştür. Numunelerin boşluk miktarını etkileyen en önemli faktörlerden bir tanesi çimentonun hidratasyonudur. Hidratasyon ilerledikçe oluşan bağlayıcı hamur kılcal su emme boşluklarını doldurarak bağlantılarını kesmektedir. Benzer şekilde uçucu kül, çimentonun ana

bileşenlerinin hidratasyonu sonucu oluşan $Ca(OH)_2$ ile yapmış olduğu reaksiyon sonucu ilave C-S-H jelleri oluşmakta ve bu da kılcal boşluk miktarını azaltmaktadır. Uçucu küllerin hidratasyon reaksiyonunun daha yavaş gerçekleşmesine bağlı olarak 28 ve 90 günlük kür süresinden sonra kılcal su emme değerlerinin giderek azaldığı gözlemlenmiştir.

- Farklı yaşlarda yapılan deneylerde en düşük kılcal su emme değerinin UK(A10) numunelerinden, en yüksek değerlerin ise UK(C30) numunelerinden elde edildiği görülmüştür.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1 Sonuçlar

Bu çalışmada uçucu küller karışımlar içerisinde üç farklı karışım yöntemi ile kullanılmıştır. Bunlar; basit ikame yöntemi, ilave yöntemi ve kısmi ikame yöntemidir. Her bir yöntemde %10, %20 ve %30 oranında ağırlıkça malzeme çıkarılmış, yerine uçucu kül eklenmiştir. Karışımların taze haldeki özelliklerinin belirlenmesinde, çökme ve birim ağırlık deneyleri, sertleşmiş haldeki özelliklerinin belirlenmesinde ise mekanik, dayanıklılık ve geçirimlilik deneyleri yapılmıştır. Mekanik özelliklerinin belirlenmesinde basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve silindir yarma dayanımı testleri uygulanmıştır. Geçirimlilik özelliklerinin belirlenmesinde su emme ve kılcal su emme testleri, durabilite özelliklerinin belirlenmesinde ise donma-çözülme döngüleri altında numunelerin fiziksel ve dayanım değerlerindeki kayıplar değerlendirilmiştir. Sertleşmiş numuneler üzerinde gerçekleştirilecek olan mekanik ve geçirimlilik testleri üretimi izleyen 7., 28. ve 90. günler sonunda, donma-çözülme testi ise 28. gün sonunda yapılmıştır. Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen deneyler neticesinde elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde sunulmuştur.

- Bütün karışımlar için ikame oranından bağımsız olarak, uçucu külün dahil edilmesi parçacıklarının inceliği ve küresel şekli nedeniyle betonun işlenebilirliğini iyileştirmiştir.

- Uçucu kül oranı arttıkça basınç dayanımının azaldığı görülmüştür. Betonda fazla miktarda uçucu kül kullanımı betonun mekanik özelliklerini olumsuz etkiler. Bu nedenle, %10 uçucu kül içeren karışımların bütün uçucu kül karışımları arasında en yüksek basınç dayanımına sahip olduğu görülmüştür. 28. ve 90. günlerde, ilave yöntemi ile hazırlanan numunelerin basınç dayanımları diğer yöntemlere göre daha yüksek sonuçlar vermiştir. Bu durum, bu yöntemde uçucu kül miktarının diğer yöntemlere göre fazla olması nedeniyle ilerleyen yaşlarda puzolanik aktivitenin basınç dayanımı üzerinde olumlu katkısı olmasıyla açıklanabilir. UK(A10) karışımı en yüksek sonuç vermiştir.

- 7 günlük numunelerin eğilme dayanımı sonuçlarında tüm uçucu kül katkılı karışımların referans numuneye göre daha az eğilme dayanımına sahip olduğunu görülmüştür. 28 günlük sonuçlarda ise tüm uçucu kül katkılı karışımların referans numuneye çok yakın eğilme dayanımına sahip olduğu görülmüştür. 90 günlük ilave ve kısmi ikame yöntemi ile oluşturulan numunelerin referans numuneye göre eğilme dayanımın sonuçları daha yüksektir. Bu sonuca göre uçucu külün sadece çimento ile ikame edilmesi eğilme dayanım değerlerini düşürmekte, çimento ve agrega ile kısmı ikamesi ya da sadece agrega ile ikamesi ilerleyen yaşlarda eğilme dayanımlarında artışa sebep olmaktadır. UK(C15+A15) karışımı en yüksek sonucu vermiştir.

- 7 ve 28 günlük silindir yarma deney sonuçlarına göre tüm uçucu kül katkılı karışımların yarmada çekme dayanımlarının referans numune dayanımlarına göre daha az değerler verdiği görülmüştür. 90 günlük sonuçlarında ise sadece UK(C15+A15) karışımı referans numuneden daha yüksek sonucu vermiştir.

- Uçucu kül ikameli numuneler ve referans numunenin donma çözülme deneyleri sonunda eğilme ve basınç dayanımlarındaki azalma değerleri incelendiğinde referans numunelerin çevrim sonrasındaki eğilme ve basınç dayanımı kaybı uçucu kül ikameli numunelere göre daha yüksek olmuştur. Buna göre uçucu kül oranı arttıkça numunelerin donma çözülmeye karşı olan direncinin artmakta olduğu söylenebilir. Bu durum, uçucu küllerin numune içerisindeki boşlukları daha iyi doldurarak donma-çözülme dayanıklılığını arttırması ile açıklanabilir. Referans ve uçucu kül katkılı tüm numunelerde donma çözülme çevrimleri sonrasında önemli oranda ağırlık kayıpları görülmemiştir. En yüksek ağırlık kaybı UK(A30) karışımında görülmüştür.

- Uçucu kül ikame miktarı arttıkça numunelerdeki su emme miktarlarının da arttığı görülmektedir. 28 ve 90 günlük kür süresinden sonra su emme değerlerinin giderek azaldığı gözlemlenmiştir. Bu nedenle, 7 günlük UK(C10), UK(C5+A5) ve UK(A10) numunelerinden elde edilen sonuçların referans numuneye çok yakın, 28 ve 90 günlük sonuçların ise referans numuneye göre daha az değerlere sahip olduğunu görülmüştür. Bu durum, numunelerin kür

süresince boşluk yapılarının azaldığını göstermektedir. İlerleyen kür süreleri boyunca uçucu küller $Ca(OH)_2$ ile birleşerek oluşturdukları C-S-H jelleriyle geçirimliliği de azaltmış olurlar. UK(A10) karışımı en az sonucu vermiştir. Buna göre uçucu külün çimento yerine agrega ile yerdeğiştirmesinin, numunelerin boşluk miktarlarının azalması yönünden olumlu etkiye sahip olduğu anlaşılmaktadır.

- Kılcal su emme deneyi sonuçları incelendiğinde uçucu kül miktarı arttıkça kılcal su emme sonuçlarının arttığı fakat ilerleyen yaşlarda bu artışın giderek azaldığı görülmüştür. Numunelerin boşluk miktarını etkileyen en önemli faktörlerden bir tanesi çimentonun hidratasyonudur. Hidratasyon ilerledikçe oluşan bağlayıcı hamur kılcal su emme boşluklarını doldurarak bağlantılarını kesmektedir. Benzer şekilde uçucu kül, çimentonun ana bileşenlerinin hidratasyonu sonucu oluşan $Ca(OH)_2$ ile yapmış olduğu reaksiyon sonucu ilave C-S-H jelleri oluşmakta ve bu da kılcal boşluk miktarını azaltmaktadır. Uçucu küllerin hidratasyon reaksiyonunun daha yavaş gerçekleşmesine bağlı olarak 28 ve 90 günlük kür süresinden sonra kılcal su emme değerlerinin giderek azaldığı gözlemlenmiştir.

- Çalışmada kullanılan yöntemler açısından sonuçlara bakıldığında basınç, su emme ve kılcal su emme deneylerinde ilave yönteminin, diğer yöntemlere göre daha iyi sonuçlar verdiği, eğilme ve silindir yarma deney sonuçlarına göre ise, kısmi ikame yöntemi ile hazırlanan karışımların diğer karışım yöntemlerine kıyasla daha yüksek çıktığı görülmüştür.

- Uçucu külün kullanılması ile, bağlayıcı malzeme olarak kullanılacak çimento miktarının azaltılmasının çok yönlü olumlu sonuçları olmaktadır. Bu sonuçlar, ekonomik ve çevresel olarak değerlendirilebilir. Uçucu külün fazla miktarda kullanılması ile daha ekonomik ve çevre dostu beton elde edilmesi mümkün olabilmekte, aynı zamanda atık bir malzeme etkin bir şekilde endüstriye kazandırılmış olmaktadır. Bunun sonucunda, küllerin çevre kirliliğine olan etkileri azaltılmış ve depolanması için gerekli maliyet ortadan kaldırılmış olmaktadır.

5.2 Öneriler

Bu çalışma sonrasında kazanılan deneyimlere göre, çimento veya kumun kısmi ikamesi olarak uçucu külün kullanılması konusunda yapılabilecek bundan sonraki araştırmalar için aşağıda sunulan önerilerin katkı sağlayabileceği düşünülmektedir.

1. Bölüm 1.1'de belirtildiği gibi, uçucu küller ASTM standartlarına göre F ve C sınıfı olarak ayrılmaktadır. Bu çalışmada sadece F sınıfı uçucu kül kullanılmıştır. Farklı olarak her iki sınıfın farklı karıştırma yöntemleri kullanılarak betonun ya da çimento harcının çeşitli özelliklerine etkileri araştırılabilir.
2. Çalışmada kullanılan uçucu kül Çayırhan Termik Santralinden elde edilmiştir. Bu çalışma kapsamında yürütülen çalışmaların farklı termik santral külleri için de yürütülmesi önerilmektedir. Bilindiği üzere, termik santrallerin yakma potansiyelleri farklı olabilmekte ve bu farklılık sonuçları etkilemektedir.
3. Çalışmada uçucu külün, çimento veya kumile ikamesinin en fazla %30 ve daha düşük oranlardaki etkisi değerlendirilmiştir. Daha yüksek oranlarda uçucu külün varlığı durumunda karışımların mekanik ve durabilite özelliklerine etkisi araştırılabilir.
4. Tezde yapılan deneysel çalışmalar dışında, hava içeriği, priz süresi tayini, sülfat etkisi, rötre tayini, ultrases geçiş hızı, elastisite modülü ve aşınma tayini gibi diğer deneylerde uygulanarak kapsamlı bir çalışma yapılabilir.
5. Uçucu külün betonun mekanik özellikleri üzerindeki etkisi 360 güne kadar kür süreleri için incelenebilir.
6. Çalışmada donma-çözülme deneyi TSE CEN/TR 15177 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, bu deneyi ASTM C666 standardına göre yapılabilir.

KAYNAKLAR

Akyüncü, V., 2012, F ve C tipi uçucu küllerin çimento ile ikame edilmesiyle üretilen betonlarin mekanik ve dayanıklılık özeliklerinin karşılaştırılarak incelenmesi, *Sakarya Üniversitesi*.

Ankesh, S., Bharat, G., Bibek Malla, C. G. G. ve Devaraja, H., 2019, Behaviourial study of the concrete on partial replacement of cement by fly ash, *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 06 (08).

ASTM C138, 2001, "Standard Test Method for Unit Weight, Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete", *Annual Book of ASTM Standards, ASTM International, West Conshohocken,* PA.

ASTM C1585-13. 2013. "Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes", *Annual Book of ASTM Standards, ASTM International, West Conshohocken,* PA.

ASTM C 230, 1997, Standard specification for sample and testing fly ash or natural pozzolan for use as a mineral admixture in Portland cement, *Annual Book of ASTM Standard 04.01,* p.172.

ASTM C293, 1979, Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (using simple beam with center point loading), *Annual Book of ASTM Standard, West Conshohocken,* PA.

ASTM C39-05. 2005. "Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens", *Annual book of ASTM standards, West Conshohocken,* PA.

ASTM C496, 2011, "Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens" , *ASTM International, West Conshohocken,* PA.

ASTM C618. 2000. "Standart Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete", West Conshohocken, PA.

ASTM C642-13. 1969. "Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete", *Annual Book of ASTM Standards, ASTM International, West Conshohocken,* PA.

Bansal, R., Singh, V. ve Pareek, R. K., 2015, Effect on compressive strength with partial replacement of fly ash, *International Journal on Emerging Technologies,* 6 (1), 1.

Beglarigale, A., Ghajeru, F., Yigiter, H. ve Yazici, H., 2014, Permeability characterization of concrete incorporating fly ash, *Proceedings of the 11th International Congress on Advances in Civil Engineering, Istanbul, Turkey*.

Berry, E. E. and Malhotra, V. M., 1986, “Fly Ash in Concrete”, Energy, Mines and Resources Canada: CANMET, Ottawa, pp. 223-229.

Bremseth, S. K., 2010, Fly ash in concrete:A literature study of the advantages and disadvantages, *SINTEF Building and Infrastructure*.

Delikurt, B. C., & Sevim, U. K., 2015, *Sugözü uçucu külünün betonun mekanik ve durabilite özelliklerine etkisi. Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 4(1), 47-58.

Gamage, N., Liyanage, K., Fragomeni, S. ve Setunge, S., 2011, Overview of different types of fly ash and their use as a building and construction material.

Gencel, O., Koksal, F., Ozel, C. ve Brostow, W., 2012, Combined effects of fly ash and waste ferrochromium on properties of concrete, *Construction and Building Materials*, 29, 633-640.

Golewski, G. L., 2018, Green concrete composite incorporating fly ash with high strength and fracture toughness, *Journal of Cleaner Production*, 172, 218-226.

Huang, C.-H., Lin, S.-K., Chang, C.-S. ve Chen, H.-J., 2013, Mix proportions and mechanical properties of concrete containing very high-volume of Class F fly ash, *Construction and Building Materials*, 46, 71-78.

Jatale, A., Tiwari, K. ve Khandelwal, S., 2013, Effects on compressive strength when cement is partially replaced by fly ash, *Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)*, 5 (4), 34-43.

Joshi, R., 2017, Effect on compressive strength of concrete by partial replacement of cement with fly ash, *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 4 (2), 315-318.

Kesharwani, K. C., Biswas, A. K., Chaurasiya, A. ve Rabbani, A., 2017, Experimental study on use of fly ash in concrete, *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 4 (9), 1527-1530.

Koçak, Y., Subaşı, S., & Emiroğlu, M., 2011, Uçucu külün betonun bazı fiziksel ve mekanik özelliklerine etkisi, *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 7(1), 14-27

Mao, M., Han, J. ve Zhang, W., 2016, Study on mechanical properties of fly ash fine aggregate concrete, *Concrete*, 6, 70-72.

Marthong, C. ve Agrawal, T., 2012, Effect of fly ash additive on concrete properties, *International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)*, 2 (4), 1986-1991.

Nath, P. ve Sarker, P., 2011, Effect of fly ash on the durability properties of high strength concrete, *Procedia Engineering*, 14, 1149-1156.

Padhye, R. ve Deo, N., 2016, Cement replacement by fly ash in concrete, *International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)*, 5, 60-62.

Pekmezci, B. ve Uyan, M., 2001, Uçucu küllerde etkinlik faktörü kavramı, *Hazır Beton*, 65-68.

Reddy, S. A. K. ve Reddy, K. C., 2013, Effect of fly ash on strength and durability parameters of concrete, *International Journal of Science and Research (IJSR)*, 4 (5), 1368-1370.

Rissanen, J., Ohenoja, K., Kinnunen, P. ve Illikainen, M., 2017, Partial replacement of portland-composite cement by fluidized bed combustion fly ash, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29 (8), 04017061.

Rkein, M., 2015, Study of utilization of fly ash as a replacement of cement and fine aggregates in concrete, *Charles Darwin University*.

Saha, A. K., 2018, Effect of class F fly ash on the durability properties of concrete, *Sustainable Environment Research*, 28 (1), 25-31.

Sama, T., Lalwani, D., Shukla, A. ve Sofi, A., 2014, Effect of strength of concrete by partial replacement of cement with fly ash and addition of steel fibres, *Journal of Civil Engineering and Environmental Technology*, 1, 5-9.

TSE CEN/TR 15177, 2011, "Betonun donma çözülme direncinin tayini- Yapısal iç hasar", *Türk Standartları Enstitüsü,* Ankara.

Upadhyaya, S. ve Chandak, R., 2014, Effect of fly ash on compressive strength of M20 mix design concrete, *International Journal of Advancements in Research & Technology*, 3 (9), 2278-7763.

Van Oss, H. G. ve Padovani, A. C., 2003, Cement manufacture and the environment part II: environmental challenges and opportunities, *Journal of Industrial ecology*, 7 (1), 93-126.

Van Oss, H. G., 2015, Minerals Yearbook: Cement, *US Geological Survey, Washington DC*.

Wankhede, P. ve Fulari, V., 2014, Effect of fly ash on properties of concrete, *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 4 (7), 284-289.

Zhang, D., Mao, M., Zhang, S. ve Yang, Q., 2019, Influence of stress damage and high temperature on the freeze–thaw resistance of concrete with fly ash as fine aggregate, *Construction and Building Materials*, 229, 116845.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Marwan Ayad Mohammed AL-Ithawi
Uyruğu : Irak
Doğum Yeri ve Tarihi : Bağdat 4/5/1992
Telefon : 05377870992
E-Posta : Mr1.ayad92@gmail.com

EĞİTİM

Derece		Adı	İlçe	İl	Bitirme Yılı
Lise	:	Alnajah	Alzafaraniye	Bağdat	2011
Üniversite	:	University of Technology		Bağdat	2015
Yüksek Lisans	:	Konya Teknik Üniversitesi		Konya	

YABANCI DİLLER

Arapça
İngilizce