

T.C.

ERZİNCAN BİNALİ YILDIRIM ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ERZİNCAN ELMA KÖY TAŞ OCAĞINDA ELDE EDİLEN  
AGREGA İLE KANGAL TERMİK SANTRALİNDE  
ELDE EDİLEN UÇUCU KÜLÜN KULLANIMIYLA YÜKSEK  
DAYANIMLI BETONUN ÜRETİLEBİLİRLİĞİNİN  
ARAŞTIRILMASI

Mohammad ALHASSN ALHAMAD

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi İsmet ULUSU

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ  
ANABİLİM DALI

ERZİNCAN

2022

Her Hakkı Saklıdır.

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### ERZİNCAN ELMA KÖY TAŞ OCAĞINDA ELDE EDİLEN AGREGA İLE KANGAL TERMİK SANTRALİNDE ELDE EDİLEN UÇUCU KÜLÜN KULLANIMIYLA YÜKSEK DAYANIMLI BETONUN ÜRETİLEBİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

Mohammad ALHASSN ALHAMAD

Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi İsmet ULUSU

Bu çalışmada Erzincan Elma köy kırmataş ve Sivas kangal termik santrali uçucu külü kullanarak yüksek dayanımlı beton üretilebilirliği araştırılmıştır. Çalışmada farklı oranlarda su/bağlayıcı (s/b), dozaj ve uçucu kül kullanılmış, parametrelerin sonuç üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Kirece doymuş su bulunan kür tankında bakıma tâbi tutulan numunelerin 7, 28, 56 ve 90 günlük basınç dayanım testleri ve 90 günlük numuneler üzerinde su emme ve kılcal su emme deneyleri yapılarak dayanım, su emme ve kılcal su emme üzerinde etkin olan parametreler belirlenmiştir. Çalışmada 0,30-0,4 S/b arasında değişen üç farklı su bağlayıcı oranları kullanılmış, çimentonun bir kısmının yerine %5, %10 ve %15 oranında uçucu kül ikame edilmiştir. Uçucu kül oranı arttıkça dayanım azalmış ve dayanım farkı % 5 civarında kalmıştır. Maksimum basınç dayanımına 61 MPa ile 600 kg/m<sup>3</sup> dozajda ulaşılmıştır. Betonun kırılma yüzeyi incelendiğinde kırılmanın agreganın kırılmasıyla oluştuğu görülmüştür.

**2022, 58 Sayfa**

**Anahtar Kelimeler:** İşlenebilirlik, Kırmataş, Uçucu Kül, Yüksek Dayanımlı Beton.

## **ABSTRACT**

Master Thesis

### **INVESTIGATION OF THE PRODUCTIBILITY OF HIGH-STRENGTH CONCRETE BY USING AGGREGATE OBTAINED IN ERZİNCAN ELMA VILLAGE AGGREGAT SOURCE AND FLY ASH OBTAINED AT KANGAL THERMAL POWER PLANT**

Mohammad ALHASSN ALHAMAD

Erzincan Binali Yıldırım University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Civil Engineering

Supervisor : Assist. Prof. Dr. İsmet ULUSU

In this study, the producibility of high strength concrete was investigated using Erzincan Elma village crushed stone. Different W/C, dosage and fly ash were used in the study. Their effects on the outcome have been investigated. 7, 28, 56 and 90-day compressive strength tests of samples subjected to lime-saturated care and water absorption and capillarity tests on 90-day samples were performed to determine the parameters effective on strength, water absorption and capillarity. In this study, different water cement ratios varying between 0.30-0.4 W/C were used. In the study, 5%, 10% and 15% fly ash was substituted for some of the cement. As the fly ash ratio increased, the strength decreased and the strength difference remained around 5%. The maximum compressive strength was reached with 61MPa at a dosage of 600 kilograms. When the fracture surface of the concrete was examined, it was seen that the fracture occurred with the breaking of the aggregate.

**2022, 58 Pages**

**Keywords:** Crushed stone , Fly ash, High strength concrete, Workability.

## TEŞEKKÜR

Tez alışmamın tamamlanmasında sağladığı imkânlar, gösterdiği yoğun ilgi ve fedakârlılığıyla hiçbir zaman yardımını esirgemeyen kıymetli danışman hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi İsmet Ulu'u 'ya Yüksek lisansım süresince desteğini, bilgi ve tecrübelerini benden esirgemeyen değerli hocam Sayın Arş. Gör. Dr. Ufuk Kandil'e, Sayın Arş. Gör. Dr. Halit Alperen Bulut'a; çalışmalarım boyunca bana vermiş oldukları yoğun destek ve teşviklerinden dolayı değerli aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi'nin ilave katkıları projenin tamamlanmasında önemli destek sağlamıştır. Ayrıca tezin oluşmasında katkısı olan herkese teşekkür ediyorum.

Mohammad ALHASSN ALHAMAD

şubat, 2022

## İÇİNDEKİLER

	Sayfa
<b>ÖZET</b> .....	<b>i</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>ii</b>
<b>TEŞEKKÜR</b> .....	<b>iii</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>iv</b>
<b>ŞEKİLLER LİSTESİ</b> .....	<b>vi</b>
<b>TABLolar LİSTESİ</b> .....	<b>vii</b>
<b>SİMGELER ve KISALTMALAR</b> .....	<b>viii</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
<b>2. KAYNAK ÖZETLERİ</b> .....	<b>3</b>
<b>3. KURAMSAL TEMELLER</b> .....	<b>12</b>
3.1. Yüksek Dayanımlı Beton.....	12
3.2. Yüksek Dayanımlı Beton Özellikleri.....	13
3.3. Mehta ve Aİtcine Göre Basitleştirilmiş Yüksek Dayanımlı Beton Tasarımı.....	13
3.4. Bağlayıcı Malzemeleri .....	15
3.4.1. Çimento .....	15
3.4.2. Uçucu kül .....	16
3.4.2.1. Uçucu kül faydaları .....	18
3.5. Katkı Malzemeleri .....	19
3.5.1. Süper akışkanlaştırıcı .....	19
<b>4. MATERYAL ve YÖNTEM</b> .....	<b>21</b>
4.1. Materyal.....	21
4.2. Yöntem.....	27
4.2.1. Agreganın fiziksel özellikleri .....	27
4.2.1.1. İri agreganın özgül ağırlığı .....	28
4.2.1.2. İnce agreganın özgül ağırlığı .....	29
4.2.1.3. Agreganın granülometrisi .....	31
4.2.2. Taze betonun birim ağırlığının belirlenmesi .....	32
4.2.3. Beton karışım hesabı ve malzeme oranlarının belirlenmesi .....	32
4.2.4. Sertleşmiş betonun birim ağırlık belirlenmesi .....	34
4.2.5. Yüksek dayanımlı beton üretimi .....	34

4.2.6. Yüksek dayanımlı beton bakımı .....	34
4.2.7. Taze betonun kıvamının belirlenmesi .....	35
4.2.8. Kılcal su emme deneyi .....	36
4.2.9. Ultrasonik geçiş hızı testi .....	37
<b>5. ARAŞTIRMA BULGULARI.....</b>	<b>39</b>
5.1. Taze Betonun Özellikleri.....	39
5.1.1. Taze beton birim ağırlığı.....	40
5.2. Sertleşmiş Betonun Bazı Fiziksel Özellikleri .....	40
5.2.1. Sertleşmiş betonun birim hacim ağırlığı.....	40
5.2.2. Sertleşmiş betonda su emme ve kılcal su emme sonuçları .....	41
5.3. Sertleşmiş Betonun Bazı Mekanik Özellikleri.....	43
5.3.1. Basınç dayanımı .....	43
5.3.2. Yüksek dayanımlı betonların ultrasonik değerleri .....	46
<b>6. SONUÇ ve ÖNERİLER.....</b>	<b>50</b>
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>51</b>
<b>EKLER.....</b>	<b>58</b>
Ek-1. Tez Çalışması Süresince Yapılan Akademik Çalışmalar .....	58

## ŞEKİLLER LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 3.1. Betonun basınç dayanımını etkileyen parametreler .....	14
Şekil 3.2. Uçucu Külün SEM analizi görüntüsü .....	17
Şekil 4.1. Karışımda kullanılan agregaların görünümü .....	21
Şekil 4.2. Agreganın partikülünü gösteren mikrograf (a,b,c) FESEM ve (d) EDS sonuçları .....	22
Şekil 4.3. Aşkale çimentosu görüntüsü .....	23
Şekil 4.4. Kangal termik santral uçucu külün mineral yapısını gösteren mikrograf (a,b)FESEM ve (c) EDS sonuçları.....	25
Şekil 4.5. İnce agrega özgül ağırlık deneyi.....	30
Şekil 4.6. Yüksek dayanım beton bakımı.....	35
Şekil 4.7. Çökme testi.....	35
Şekil 4.8. Kılcal su emme deneyinden alınan bir görüntü.....	36
Şekil 4.9. Ultrasonik test görüntü şeması.....	37
Şekil 4.10. Ultrasonik test görünümü.....	38
Şekil 5.1. Kılcal su emme sonuçları.....	42
Şekil 5.2. (a,b,c,d). Beton basınç dayanım sonuçları .....	45
Şekil 5.3. Beton kırılma yüzeyi.....	46
Şekil 5.4. Ultrasonik ses geçiş hızı ile basınç dayanımı arasındaki ilişki.....	48

## TABLULAR LİSTESİ

### Sayfa

Tablo 4.1. Agregas kimyasal analizi sonuçları .....	23
Tablo 4.2. CEM I 42.5 R çimentosunun özellikleri .....	24
Tablo 4.3. Uçucu kül kimyasal analizi sonuçları .....	26
Tablo 4.4. Süper akışkanlaştırıcı özellikleri.....	27
Tablo 4.5. İri agregas özgül ağırlığı özellikleri (4-8 mm ).....	28
Tablo 4.6. İri agregasının özgül ağırlığı özellikleri (8-16 mm ).....	29
Tablo 4.7. İnce agregas özgül ağırlık özellikleri(0-4mm).....	30
Tablo 4.8. Agregas gronülometrisi fuller bağıntısı.....	31
Tablo 4.9. Karışımlardaki malzeme miktarları.....	33
Tablo 5.1. Taze beton birim hacim ağırlığı .....	40
Tablo 5.2. Elma köy kırmataş agregalı YDB da su ve kılcal su emme sonuçları.....	41
Tablo 5.3. Elde edilen betonların bazı mekanik özellikleri.....	44
Tablo 5.4. Ultrasonik test deneyi sonuçları.....	47
Tablo 5.5. Elde edilen ultrasonik ses geçiş hızı deneyi sonuçları.....	48

## SİMGELER ve KISALTMALAR

### Simgeler

S/B	Su/ Bağlayıcı
Mm	Milimetre
Cm	Santimetre
PH	Power Hidrojen
Fe	Demir
Ca	Kalsiyum
S	Sülfür
C	Karbon
O	Oksijen
F	Flor
Mg	Magnezyum
Al	Alüminyum
SO <sub>3</sub>	Kükürt Trioksit
CaO	Kalsiyum Oksit
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Alüminyum Oksit
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Demir Trioksit
SiO <sub>2</sub>	Silikon Dioksit
Na <sub>2</sub> O	Sodyum Oksit
K <sub>2</sub> O	Potasyum Oksit
µm	Mikro Metre
C <sub>3</sub> S	Kalsiyum Silikatlar
CO <sub>2</sub>	Karbondioksit
Ca(OH) <sub>2</sub>	Kalsiyum Hydroxide
C-S-H	Kalsiyum-Silikat-Hidrat
C <sub>3</sub> A	Kalsiyum, Alümina
MPa	Mega Paskal
N/mm <sup>2</sup>	Newton/Metre Kare
kg/m <sup>3</sup>	Kilogram/Metre Küp
Y <sub>agrega</sub>	Agrega Özgül Ağırlık
T	Zaman

Q	Emilen Su Miktar
$K \times 10^{-5}$	Kılcal Su Emme Katsayısı

### **Kısaltmalar**

ACI	American Concrete Institute
ASTM	American Society For Testing And Materials
TSE	Türk Standartları Enstitüsü
YDB	Yüksek Dayanım Beton
KYB	Kendiliğinden Yerleşen Beton
YHUKB	Yüksek Hacimli Uçucu Kül Beton
YASAK	Yüksek Aralıklı Su Azaltıcı Katkı
SEM	Scanning Electron Microscope
ÇKA	Çevreyi Koruma Ajansı (EPA)
UYPB	Ultra Yüksek Performanslı Beton (UHPC)
FKI	Federal Karayolu İdaresi
YPB	Yüksek performanslı Beton
NDB	Normal Dayanım Beton
UGHD	Ultrasonik Geçiş Hızı Deneyi
DK	Dakika

## 1.GİRİŞ

Yüksek dayanımlı betonun tanımı; inşaat sektöründeki gelişmelere bağlı olarak zamana ve bölgeye göre değişmektedir. ACI, dayanımları 40 MPa'nın üzerinde olan betonları yüksek dayanımlı beton (YDB) olarak kabul etmektedir. Mehta 'ya (2004) göre YDB için üst sınır olarak 80 MPa olarak belirtilmiştir. Srilanka'da 40 MPa'dan daha yüksek dayanıma sahip betonlar YDB olarak kabul edilmektedir. Beshah'a (2019) göre yüksek dayanımlı betonların genel performansı tek başına basınç dayanımıyla değerlendirilemez, bu betonların aynı zamanda, yüksek işlenebilirliğe sahip olmaları gerekmektedir. Yüksek performans kriterleri, belirli şartlara bağlıdır ve yüksek dayanım, yüksek performanslı betonun temel bir özelliği olarak kabul edilir (Beshah, 2019). Türkiye'de 50- 60 MPa aralığındaki beton ticari olarak üretilirken son yıllarda, yüksek dayanımlı betonun geliştirilmesi yönünde önemli ilerlemeler dikkati çekmektedir. Saini ve Ashish (2015) göre yüksek dayanımlı betonlar yüksek elastikide modülü, yüksek çekme dayanımlı, erken dayanım kazanma, düşük sünme nedeniyle yüksek binalarda, köprü inşaatlarında, prekast ve ön gerilmeli betonarme uygulamaları vb. diğer alanlarda artan bir ilgi görmektedir. Bu betonlar binalarda kolon boyutlarının küçültülmesi ve daha yüksek rijitlik gibi önemli avantajlar sunmaktadır (Saini ve Ashish, 2015). Gelişen ve gelişmekte olan Türkiye için, gün geçtikçe büyüyen inşaat sektörüyle YDB' a duyulan ihtiyaç giderek artmaktadır. Dünyada artan arsa maliyetleri dolayısıyla, yatay büyüme yerine dikey büyüme zorunlu hale gelmiştir. Buda YDB'nun kullanımını zorunlu kılmaktadır (Beshah, 2019). YDB kullanılarak yapılan binalarda binanın iskeletini oluşturan kolonlarda YDB kullanıldığı zaman, kat başına düşen kullanılabilir alanda ciddi bir artış olabilmektedir. Bu yöntemle yapılan binalarda kullanılan donatı miktarı da azalabilmektedir (Çam, 2019). Böylelikle kullanılabilir alan artarken malzemedenden de tasarruf edilmiş olur (Çam, 2019). Türkiye'de YDB'nin yapısal tasarımı ile ilgili belirli bir standardın olmaması, YDB kullanımını kısıtlayan en büyük etmendir. Sektörde yer alan üretici firmalar tarafından yapılan araştırmalar deneme çalışmasından ileriye gidememektedir. Deneme amaçlı olarak yapılan beton dökümlerinde, yüksek dayanımı elde edebilen beton üreticileri bulunmaktadır. Dünya genelinde nitelikli hazır beton santralleri, gerçekleştirilecek proje doğrultusunda 50 MPa ve üzeri basınç dayanımına sahip beton için gerekli ufak çaplı araştırmalar ve üretimini yapabilmektedir (Ziółkowski ve Niedostatkiewicz, 2019).

Türkiye’de yapı elemanları ve yapıların kullanım amaç ve süresine uygun güvenlikle tasarlanması, hesaplanması, boyutlandırılıp donatılması ve yapımı ile ilgili kuralların ve koşulların tanımlandığı “TS 500 - Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları(2000)” isimli standart kullanılmaktadır. Bu dokümanın ilgili kısmında şu ifade yer almaktadır: “Bu Standard, C50’den daha yüksek dayanımlı betonlarla yapılan betonarme yapıların tasarım ve yapım kurallarını kapsamaz.” Bu ifade sebebiyle, yüksek dayanımlara sahip betonun tasarlanmasının önü kesilmektedir. Buna ek olarak aynı maddede, “Deprem bölgelerinde yapılacak yapılar için bu standartta öngörülen temel ilke ve koşullara ek olarak, Bayındırlık ve İskân Bakanlığınca hazırlanan “Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik (2007) gerekleri de yerine getirilmelidir” ifadesi bulunmaktadır.

#### • *Çalışmanın Amacı*

Erzincan’da beton üretiminde genellikle Fırat agregası kullanılmaktadır. Bu agrega ofiyolit ve serpantin içerdiği için zamanla bozularak dayanım kaybına neden olmaktadır. Fırat agregası kullanılarak üretilen betonların basınç dayanım testi sonucunda kırılma yüzeyleri incelendiğinde kırılmaların agreganın kırılmasıyla ve sıyırılmasıyla oluştuğu gözlemlenmektedir. Bu durum, bu agreganın beton üretimi için uygun olmadığını göstermektedir (Neville, 1995). Fırat agregasının bu olumsuz durumu bu bölgede farklı agrega kullanımını zorunlu kılmaktadır. Bu kapsamda Erzincan’da beton santrallerinde kullanılmaya başlanılan Elma köy agregası üzerinde bir çalışma yapılmasının uygun olacağı kanaati oluşmuştur. Elma köy kırma taş kullanılarak Yüksek Dayanımlı Betonun üretilebilirliğinin araştırılması, yine bu bölgede bulunan Sivas-Kangal Termik santralinde elde edilen atık uçucu külün kullanımı ile çevre kirliliğinin azaltılmasına katkı sağlamak için bu uçucu külün üretilecek yüksek dayanımlı betonda kullanılabilirliğinin araştırılması uygun görülmüştür. Aynı zamanda Erzincan’daki deprem bölgesi olması dolayısıyla yapılarda daha yüksek dayanımlı beton kullanılarak depremlerde oluşabilecek hasar ve yıkımları minimize etmek amaçlanmıştır.

## 2. KAYNAK ÖZETLERİ

Betonda, silis dumanı ve uçucu külün etkilerinin daha iyi anlaşılması için çeşitli araştırmaların yapılmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Ancak yüksek dayanımlı beton için yapılan araştırma çalışmalarının sınırlı olduğu görülmektedir. İlgili alanda yapılan çeşitli araştırmalardan bazıları aşağıda gösterilmiştir.

Limbachiya (2000), eski betonarme yapıların ayrıştırılması sonucu elde edilen agregaların yüksek dayanımlı betonda kullanılabilirliği üzerine bir araştırma yapmıştır. Bu agregaların %30 kadar kullanımının betonun özelliklerinde bir olumsuzluk oluşturmadığını belirlemiştir.

Camões (2003), düşük maliyetli, yüksek performanslı beton üretiminin mümkün olduğunu ve uçucu kül kullanımının betonun dayanıklılık özelliklerini artırabileceğini tespit etmiş, iyileştirme derecesinin, karışım oranına ve uçucu külün özelliklerine bağlı olarak değişebileceğini belirlemiştir. Aynı zamanda uçucu külün yüksek dayanımlı betonun kuruma rötresi, su emme ve klorür iyonu gibi özellikleri üzerinde de etkili olduğunu belirtilmektedir.

Kumbhar ve Murnal (2014), yapmış olduğu çalışmada normal dayanımlı betonu, basınç dayanımı 20- 50 MPa arasında, yüksek dayanımlı betonu basınç dayanımı 50-100MPa arasında ve ultra yüksek dayanımlı betonu 100-150 MPa arasında değişen bir beton olarak tanımlamıştır.

Aİtcin (1998) ve Neville (1995), yüksek dayanımlı betonun dayanımının genel olarak çimento hamurunun yapısına, agreganın özelliğine ve agrega-çimento hamuru geçiş bölgesi özelliklerine bağlı olarak değiştiğini söylemektedirler. Kırılma üzerinde en zayıf olan parametrenin geçiş bölgesi olduğunu, bu özelliklerin s/b oranı düşürülerek ve aynı zamanda agreganın maksimum "tane" çapı küçültülerek iyileştirilebileceğini belirtmişlerdir.

Aİtcin (2007)'e göre yüksek dayanımlı beton, normal dayanımlı betonun yetersiz geldiği yüksek dayanım gerektiren yapılarda kullanılır. Yüksek dayanımlı betonun avantajları ve dezavantajları vardır. Yüksek dayanımlı beton seçmenin tüm çevresel ve ekonomik sonuçlarını dikkate almak gerekmektedir. Çünkü özel hususlar, dayanım özelliklerinin

diğer tarafında ele alınmalıdır. İstenen özellikleri elde etmek için kullanılan malzemeler ve betonun dayanımı arttırmak için kullanılan katkıları beton maliyetini çok artırmaktadır. Beton karışım oranlarındaki küçük değişikliklerin, betonun basınç dayanımında büyük değişikliklere yol açabileceği kaçınılmaz bir gerçektir. Yüksek dayanımlı beton, normal dayanımlı betonun dayanamayacağı yüklerle dayanır. Beton yapısında var olan ve kolay kırılma özelliği gösteren  $\text{Ca(OH)}_2$  kristallerin oluşmasını önlemek gerekir. Bunların oluşumu ise puzolan kullanılarak çözülebilir.

Neville 'ye (1995) göre süper akışkanlaştırıcı kullanarak s/b oranını düşürmek ve uçucu kül veya silis dumanı gibi aktif puzolanlar kullanarak  $\text{Ca(OH)}_2$  oluşumunun önlenmesi, yüksek dayanımlı beton bileşiminin temelini oluşturmaktadır.

Haach (2011), yapmış oldukları çalışmada betonun fiziksel ve mekanik davranışını etkileyen önemli parametrelerin s/b oranı ve agrega gronülometrisi olduğunu belirlemişlerdir. Betonunda su/bağlayıcı oranının artmasının sertleşmiş betonun mekanik özelliklerini azalttığını ve işlenebilirliğini arttırdığını söylemektedirler.

Russell (2013), mevcut haliyle ultra yüksek performanslı betonun (UYPB), yaklaşık 2000 yılında Amerika Birleşik Devletleri'nde ticari olarak temin edilebilir hale geldiğini belirtmektedir. Amerikan Federal Karayolu İdaresi, 2001 yılında UHPC'nin karayolu altyapısı için kullanımının araştırılmasına başladığını ve 2002'den beri ulaştırma kısımlarında bu teknolojinin kullanılmaya başladığını belirtmektedir.

Habert (2014), durabilite üzerinde araştırma yaparken, özellikle yeni 'çevreci' beton tiplerini geliştirmiştir. Bu bölümde çimento üretimi sırasındaki her süreç ve alternatifler hakkında literatür araştırması yapmıştır. Portland çimentolarının çevre üzerindeki etkileri üzerinde ayrıntılı bir çalışmanın ardından, ilave maddelerle elde edilebilecek iyileştirme potansiyellerinin değerlendirilmesi yapılmıştır. Son olarak, sülfalüminat veya magnezyumlar gibi alternatif bağlayıcıların çevresel etkileri ve alkali ile etkinleşen bağlayıcıları araştırılmıştır.

Xiao (2018), yapmış olduğu çalışmada yüksek performanslı betonun bütün yapılar için uygun kullanımının belirlenmesi ve yerel malzemeler kullanılarak elde edilmesi için bir araştırma yapmıştır. Sonuç olarak; mineral katkı kullanımıyla maliyetin düştüğünü ve her

tür yapı için uygun bir beton elde edildiğini belirtmektedir. Zamanla ve teknolojinin gelişmesiyle maliyetleri düşürmek, betona istenilen fiziksel ve mekanik özellikleri kazandırmak için çeşitli malzemeler toz halinde katılmaya başlanmıştır.

Naik (1994), yaptıkları çalışmada, çimento yerine bağlayıcı olarak çimento ağırlığının % 0- 70'e kadar C sınıfı uçucu kül ile değiştirilen karışım kullanılarak betonlar üretilmiştir. Yapılan testlerde 91 günde uçucu külün betonlarının hava ve su geçirgenliğini azalttığını belirlemişler. Aynı zamanda uçucu kül katkılı betonun erken yaşta normal betona göre daha yüksek su emme değerine sahip olduğunu belirlemiştir. Keza C sınıfı uçucu külü çimentoya %10 oranında ekleyerek optimum s/b oranını 0.60 olarak bulmuş; 0.25-0.40 aralığında s/b oranı ve %60'a varan F sınıfı uçucu kül içeriği kullanarak üretilen betonların emicilik katsayısının düştüğünü belirlemiştir.

Atiş (2003), yüksek oranda (%50-70) normal portland çimentosunun yerine uçucu kül kullanarak elde edilen betonların fiziksel ve mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Karışımda s/b oranı 0.28 ile 0.34 arasında değişirken, bazı karışımlarda süper akışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Yüksek oranda uçucu kül kullanımıyla elde edilen betonların 1 günde tatmin edecek bir basınç dayanım değerine ulaştığı, çimentonun %50 yerine uçucu kül ikame edildiğinde en yüksek basınç dayanım değerine ulaştığını belirlemiştir.

Camoses (2003), uçucu kül, cüruf ve silis dumanı gibi bağlayıcı malzemelerin kullanımının giderek arttığını belirtmektedir. Bu malzemelerin betonun dayanımı ve dayanıklılığı üzerindeki etkileri üzerinde son yıllarda kapsamlı araştırmaların yapıldığını belirtmektedir. Uçucu külün, toz haline getirilmiş kömürün yanması sonucu ortaya çıkan bir yan ürün ve puzolanik bir malzeme olduğunu belirtmektedir. Bu malzemeler su ile karıştırıldığında, portland çimentosunun hidrasyonu ile oluşan yapıya benzer yapılar oluşturduğunu belirtmiştir. Uçucu küllü yapının daha yoğun ve daha az geçirgen olduğunu mikro yapıdan görmüştür. Uçucu külün ikame oranının %15 - %25 arasında değiştiğini belirtmektedir.

Chindaprasirt (2004), Avustralya'da elde edilen F sınıfı uçucu külün çimentonun %30 ve %40 yerine kullanılarak elde edilen betonların özellikleri ile portland çimentosu kullanılarak elde edilen betonların özellikleri ile kıyaslamıştır. Uçucu kül ikamesi

betonların dayanım ve durabilenlerinin daha yüksek olduğu, büzülme rötrelerinin daha düşük olduğunu belirlemiştir.

Dili ve Santhanam (2004)'a göre su azaltıcılar optimal dozajlarda kullanıldığında, betonun işlenebilirliğini (viskozitesini) iyileştirirken, su-çimento (veya bağlayıcı) oranını azaltır. Ek bağlayıcıların (puzolan) eklenmesi, ikincil hidratların oluşumuyla boşlukları doldurduğunu ve reoloji güçlendirerek çimento hamurunun mekanik özelliklerini iyileştirdiğini belirtmektedirler.

Malhotra'ya (2005) göre gelişmekte olan ülkelerde inşaat sektörünün artmasıyla çimentoya olan ihtiyaç artmıştır. Çimentoya olan ihtiyacın, çimentonun termik santrallerden temin edilen iyi kalitede uçucu kül ile ikame edilmesiyle azaltılabileceğini; yüksek performansın geliştirilmesinde, dayanıklılığın artırılmasında süper akışkanlaştırıcı ile birlikte yüksek hacimde uçucu külün katkısının olduğunu belirtmektedir. Araştırmasında ayrıca, ikame malzemeleriyle çimento tüketimini azaltarak atmosfere salınan CO<sub>2</sub> emisyonunu azaltmanın mümkün olduğunu belirtmektedir.

Safiuddin ve Zain (2005), yapmış oldukları çalışmada, silis dumanı ve uçucu külün yüksek performanslı betonun taze ve sertleşmiş özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Silis dumanı ve uçucu kül, farklı beton karışımlarına ayrı ayrı ve birlikte dâhil edilmişlerdir. Silis dumanı ve uçucu külün bireysel ve birleşik etkileri, betonun çeşitli taze ve sertleşmiş özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Test sonucunda, yüksek performanslı betonun özellikleri üzerinde silis dumanının çok etkili olduğunu belirlemişlerdir. Onlara göre silis dumanı, betonun maksimum basınç dayanımı, dinamik elastiklik modülü ve ultrasonik geçiş hızına ulaşmasına katkı sağlamıştır. Buna karşılık, uçucu kül tek başına yüksek performanslı betonun özelliklerini iyileştirmeye kayda değer ölçüde katkıda bulunamaz, ancak silis dumanı ve uçucu kül birlikte betonun taze ve sertleşmiş özelliklerini iyileştirmiştir.

Jones ve McCarthy (2005), çimento ve ince agreganın bir kısmının yerine uçucu kül kullanmış, uçucu kül ikame oranını %0'dan %50'ye kadar değiştirmişlerdir. %25 ila %35 arasında uçucu kül içeren betonun en iyi basınç dayanımı sağladığını bildirmiş, uçucu kül artışının puzolan etkisinden kaynaklandığı sonucuna varmışlardır.

Thomas (2007), tarihsel olarak, uçucu külün betonda %15 ile %25 arasında değişen miktarda kullanıldığını, gerçek kullanılan miktarın, uygulamaya ve kullanım özelliklerine bağlı olarak değiştiğini belirtmektedir. Uçucu kül ikame limitleri bazı yapılarda (örneğin temeller ve barajlar) sıcaklık artışını kontrol etmek için daha yüksek seviyelerde (%30 ile %50) kullanılmıştır. Son yıllarda araştırmalar yüksek doz seviyelerinin (%40 ile %60) inşaat uygulamalarında ve beton üretiminde kullanılabileceğini, bu oranlarda da yüksek mekanik özelliklere ve dayanıma sahip beton üretmenin mümkün olduğunu ortaya koymuştur.

Srivastava (2009), Kendiliğinden Yerleşen Beton (KYB) numunesinin su emme değerlerinin silis dumanı ikame oranının artmasıyla azaldığını (%5'ten %20'ye) belirlemiştir. Uçucu külün ince agreganın bir kısmıyla değiştirilmesiyle (%25-%40) YPB'nin su geçirgenlik ve dayanım özelliklerinin iyileştirilebileceği sonucuna varmıştır. Su emme, geçirgenlik, sülfat etkisi dayanımı ve dayanıklılık özelliklerinin, geleneksel yüksek performanslı beton ile karşılaştırıldığında uçucu kül ve silis dumanı esaslı beton malzemelerin daha iyi sonuç verdiğini belirlemiştir.

Muthupriya (2010), yüksek performanslı betonu, genellikle ekonomik ve teknik problemlere yol açan büyük miktarda çimento içeren beton olarak tanımlamaktadır. Düşük çimento içeriğine sahip yüksek performanslı betonu elde etmek için yeni bir yaklaşım sunmaktadır. Fuller granülometri eğrisinin, beton karışımlarının yüksek yoğunluğunu sağlamak ve gerekli bağlayıcı içeriğini azaltmak için beton tasarımında kullanılmasını önermektedir. Çeşitli puzolanik malzemeleri (silis dumanı, uçucu kül ve ince uçucu kül) içeren çeşitli karışımlar hazırlanmış ve elde edilen numuneler test edilmiştir. İnce uçucu külün beton performansı üzerindeki etkisini belirlemek için, betonun mekanik özellikleri, gözenekliliği ve dayanıklılığını araştırmıştır. Sonuçlar basınç dayanımı ve elastik modülünün belirlenmesi, durabilite, su geçirgenliği, su emme ve klorür yayılımı açısından incelenmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, ince uçucu külün, mukavemet gelişimi ve dayanıklılık bakımından normal uçucu külden daha iyi performans gösterdiğini belirlemiştir. Cüruf çimentosu, ince uçucu kül ve düşük w/b oranına sahip silis dumanı içeren üçlü sistem, beton mekanik özellikleri ve dayanıklılığı açısından tüm sistemler arasında en iyi performansı gösterdiğini belirtmektedir.

Nath ve Sarker (2011), uçucu külün çimentonun bir kısmının yerine ikamesiyle üretilen betonun dayanıklılığı üzerindeki etkisi üzerine çok sayıda araştırma yapıldığını belirtmektedirler. Kendi yapmış oldukları çalışmada, betonda uçucu kül uygulamasının dayanıklılık özelliklerini artırabileceğini, ancak iyileştirme derecesinin karışım oranına ve uçucu külün özelliklerine bağlı olduğunu belirtmektedirler. Yaptıkları çalışmada uçucu külün yüksek dayanımlı betonun kuruma rötresi, su emme ve klorür iyonu etkisini araştırmış, uçucu külün betonun fiziksel ve mekanik özellikleri üzerinde olumlu katkı yaptığını belirlemişlerdir. F sınıfı uçucu külün çimentonun mekanik özelliklerinde büyük bir artış sağladığını gözlemlemişlerdir. Uçucu külün betonun klor geçirimsizliğini önemli oranda azalttığını, basınç dayanımını artırdığını, 28 günlük basınç dayanımlarının 65 ile 85 MPa arasında değiştiğini belirlemişlerdir.

Pofale ve Deo (2011), yapmış oldukları çalışmada uçucu külün ince agregaya (kum) alternatif olarak kullanılmasının, daha çevreci ve yoğun beton üretmek için ekonomik bir çözüm olduğunu belirtmişlerdir. Bu uygulamayla daha yüksek dayanımlı beton ve daha düşük s/b oranı kullanılarak çimento miktarının azaltarak istenen özelliklere sahip beton üretmenin mümkün olduğunu söylemektedirler. Kontrol betonu ile karşılaştırıldığında, kumun bir kısmının yerine uçucu külün ikame edilmesiyle betonun eğilme mukavemetinde %13'lük bir artış olduğunu belirlemişler. N/mm<sup>2</sup> başına maliyet karşılaştırıldığında, uçucu kül ile değiştirilen kumlu betonun süper akışkanlaştırıcılar ve süper akışkanlaştırıcılar olmadan sırasıyla yaklaşık %18 ve %25 ekonomik olduğunu, önerilen yöntemle yaklaşık %6 çimento tasarrufu sağlanabileceğini belirlemişlerdir.

Deo (2014), inşaat sektöründe yüksek hacimli uçucu kül kullanılarak üretilen beton (YHUKB) kullanımının artırılmasını, 28 günlük YHUKB dayanımını artırarak kullanımının yaygınlaştırılmasını teşvik etmişlerdir. Hindistan'da betonda uçucu kül kullanımının şu anda çok düşük miktarda olduğunu belirttikeler, bu düşük tüketimin nedenini, uçucu küldeki daha düşük kireç miktarı ve uçucu külün kalitesine bağlamışlar. Uygun şekilde tasarlanmış bir (YHUKB) sisteminde, inşaat endüstrisinin ihtiyaç duyduğu yeterli erken dayanım elde edilebilirse, beton üretimindeki büyük problemin çözülebileceğini belirtmiştir. Sonuçlar ayrıca, uçucu küllü betonlarda iyi kür etkisiyle betonun basınç dayanımını ve ultrasonik geçiş hızının artırabildiğini göstermişler.

Abd Elrahman ve Hillemeier (2014), yapmış oldukları araştırmada yüksek performanslı betonun yapımında çok çeşitli uygulamalar olduğunu kabul etmektedirler. Spesifik uygulamalar için özel olarak üretilmiş ve geleneksel tip normal dayanımlı betona göre daha yüksek dayanım ve durabiliteye sahip bir malzeme olduğunu belirtmektedirler. YDB üretmek için normal bileşenlerle birlikte bir yandan metakaolin, silis dumanı ve uçucu kül gibi mineral katkıları, diğer yandan süper akışkanlaştırıcıların kullanımının zorunlu olduğunu belirtmektedirler. Betonda mineral katkıların kullanılması, betonun dayanım, dayanıklılık, işlenebilirlik ve ekonomiklik gibi özelliklerini iyileştirdiğini belirtmektedirler. Çalışmanın kapsamı silis dumanı, metakaolin ve uçucu kül gibi mineral katkıların YDB'nun performansına etkisini araştırmaktır. Mineral katkıların pozolanik reaksiyonları, dayanım özelliklerine katkıları ve dayanıklılık üzerine etkileri araştırılmıştır. Mineral katkıların optimum ikamesi bulmak için basınç dayanımı, çekme dayanımı ve eğilme dayanımı gibi dayanım özellikleri araştırılmıştır. %5, %10 ve %15 gibi ikamelerin, YPB'nun basınç dayanımı üzerindeki etkilerinin zaman bağlı olarak değişimini belirlemek için 3 gün, 7 gün, 28 gün sonra basınç testine tâbi tutulmuştur. Dayanımları karşılaştırılmış ve her bir mineral katkının optimum ikame düzeyini belirlenmişler. Silis dumanı ve uçucu kül için 7 gün ve 28 gün farklı düzeylerde etkili faktörleri belirlemişler. Yapılan çalışmalardan silis dumanının özellikle erken yaşlarda betonun mukavemetini arttırdığı gözlemiştirler.

Longarini (2014), yapmış olduğu çalışmada, belirli yüksek dayanıma sahip betonu (YDB) üretmek için uçucu kül kullanımını ve YDB 'da Portland çimentosunun bir kısmının yerine uçucu külün ikamesini araştırmıştır. YDB'nun performansı ve ekonomik yönleri göz önüne alındığında, özellikle durabil bir inşaat tasarımı için geğerli bir çözüm olarak görmüştür. Yer altı yapıları için gösterilen avantajların, yer üstündeki yapılar için de değerlendirilebilir olduğunu söylemektedir. Beton karışım tasarımı için uçucu kül kullanımı ile ilgili en önemli teknik düzenlemeler tartışılmış ve mekanik direncin artması ve kimyasal etkilere karşı daha iyi sonuç elde edildiğini belirtmektedir. Karışımda, uçucu kül kullanılarak C3A ve C3S yüzdelerinin düşürülmesi sonucu daha düşük hidretasyon ısının olduğunu belirtmektedir.

Deo (2016), yapmış olduğu çalışmada uçucu külün kullanımının çimentonun % 50 sinin yerine kullanımının mümkün olduğu belirtilmektedir. Ayrıca, sülfonatlı naftalin

formaldehit süper plastikleştirici ile birlikte yüksek dayanımlı çimento ve çok yüksek reaktif uçucu kül kullanıldığında, çimentonun uçucu kül ile %70'e varan oranda değiştirilebileceğini belirtmektedir.

Wang (2012), betonun teknolojik gelişimi ve yüksek dayanımlı yapı malzemelerine olan talebin, Ultra Yüksek Performanslı Betonun (UYPB) geliştirilmesine ivme kazandırdığını belirtmekte. Ayrıca bağlayıcı içeriğinin, s/b oranının, granüle yüksek fırın cürufu içeriğinin ve kireçtaşı tozu ikamesinin sırasıyla betonun akışkanlığına ve basınç dayanımına etkisini araştırmış. Süper akışkanlaştırıcı ve mikro metal katkı maddelerinin eklenmesinin, 0,14 ile 0,18 arasında çok düşük bir s/b oranı ile UYPB üretimini mümkün kıldığını, maksimum 268 mm'lik bir çökmeyle mükemmel işlenebilirlik ve 175,8 MPa'lık basınç dayanımına sahip beton üretmenin mümkün olduğunu belirtmektedir.

He ve Wang, (2007), su azaltıcılar, geciktiriciler ve süper akışkanlaştırıcılar, bir beton karışımının akıcı özelliklerini korurken, bir karışımındaki su içeriğini azaltmak veya betonun prizini yavaşlatmak için eklenen beton katkıları olduğunu belirtmektedirler. Bu katkıları, beton veya harcın özelliklerini değiştirerek elle çalışmaya daha uygun hale getirmek veya mekanik enerji tasarrufu gibi diğer amaçlar için kullanılabilirliğini belirtmektedirler.

Osuji ve Ikogho, (2018) , YDB karışımındaki naftalin formaldehit süper plastikleştiricinin optimum kullanımı %1,5 civarında olduğunu belirtmektedirler. Silis dumanının, bir betonda çimentonun hidrasyon derecesini arttırdığını ve  $\text{Ca(OH)}_2$  miktarını azalttığını belirtmektedirler.

Kovler ve Roussel (2011) ,taze ve sertleşmiş betonun aynı özellikleri farklı şekillerde başka malzemelerden elde edilebildiği için evrensel olarak kullanılabilir bir karışım tasarım yöntemi geliştirmenin her zaman zor olduğu malzemenin bileşimi ve özellikleri bölgeden bölgeye göre değiştiği için. su/çimento oranını azaltarak ve silis dumanı yüzdesini artırarak betonun dayanımının artırılabilirliği sonucuna varmışlardır.

Al-Amoudi (2006), süper akışkanlaştırıcıların, çimento ve çimento + silis dumanı katkılı betonlarda oluşacak plastik rötre üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Sonuç olarak; şiddetli bozucu ortamlara maruz kalacak betonlarda durabilite probleminin çözümü için akışkanlaştırıcı kullanımının zorunlu olduğunu söylemektedir. Aynı zamanda; yüksek

dayanımlı hafif betonlarda, artan su ihtiyacını azaltmak için, süper akışkanlaştırıcıların kullanılmasını önermektedir.



### 3. KURAMSAL TEMELLER

#### 3.1. Yüksek Dayanımlı Beton

Yüksek dayanımlı beton, normal betona atfedilemeyen özel niteliklere sahip betonu tanımlamak için kullanılan bir terimdir. Yüksek dayanım, betonun aşağıdaki özelliklerden bir veya daha fazlasına sahip olduğu anlamına gelir. Bu özellikler; düşük rötre, düşük geçirgenlik ve yüksek dayanımdır. Henry Russell (2013), yüksek dayanımlı betonu "sadece geleneksel malzemeler ve normal karıştırma, yerleştirme ve kür uygulamaları kullanılarak, her zaman rutin olarak elde edilemeyen özel performans ve homojenlik gereksinimlerini karşılayan beton" olarak tanımlamıştır. Kumbhar ve Murnal (2014), yüksek dayanımlı betonun gereksinimlerini; yüksek işlenebilirlik, şiddetli bozucu ortamlarda ayrışmadan uzun vadede mekanik özelliklerini koruma, erken dayanım kazanma, hacim sabitliği veya hizmet ömrü boyunca istenilen davranışları gösterecek özelliklere sahip olmak şeklinde tanımlamaktadırlar. Yüksek dayanımlı beton tipik olarak 28 günlük silindir basınç dayanımı 42 MPa'dan büyük olan beton olarak kabul edilir. YDB'nin ACI tanımına yönelik, betonun durabilitesinin zorunlu olmadığı konusunda büyük bir eleştiri var. Yüksek dayanımın, aynı zamanda yüksek durabiliteye sahip olacağı fikrinin doğru olmadığı, yayınlanmış birçok literatürde belirtildiği gibi, YDB kullanılarak üretilen yapılarının birçoğunda şiddetli bozucu ortamlarda erken çatlakların ve bozulmaların oluştuğu gözlemlenmiştir (Kumbhar ve Murnal, 2014). Beton; yüksek dayanım, şantiyede üretimin, taşınması ve yerleştirilmesinin kolay olması, istenilen şekil ve boyutta kalıplanabilmesi nedeniyle tüm dünyada inşaat amaçlı en çok kullanılan ve tercih edilen bir yapı malzemesidir (Murty, 2001). Beton ve betonarme uygulama yönetmeliğinde beton; normal ve yüksek dayanımlı beton olarak sınıflandırılmaktadır. Normal dayanımlı betonu YDB'na göre daha da popüler hale getiren, bu betonun malzemesinin çoğu yerde kolayca bulunulup üretilebilir olmasıdır. Normal beton, 28 günlük 150 mm küp basınç dayanımı 25-42 N/mm<sup>2</sup> arasında değişen beton; yüksek dayanımlı beton ise 28 günlük 150 mm küp basınç dayanımı 42-80 N/mm<sup>2</sup> arasında değişen beton olarak tanımlanabilir (Murty, 2001). İnşaatte en yaygın olarak kullanılan malzeme olmasına rağmen, betonun düşük çekme dayanımı ve gevreklik gibi bazı olumsuzlukları vardır. Ultra Yüksek Performanslı Beton (UYDB) Federal Karayolu İdaresi'nin (FKI) bildirdiği gibi, Portland çimentosu, ince silis kumu, silis dumanı, kuvars

tozu, yüksek oranda su azaltıcı 0,25'ten düşük su/ bağlayıcı oranı kullanılarak üretilen bir beton türüdür (Shafieifar , 2017 ).

### **3.2. Yüksek Dayanımlı Beton Özellikleri**

Yüksek dayanımlı beton olarak bilinen beton, sadece yüksek dayanıma sahip değil, aynı zamanda yüksek durabiliteye de sahip olduğu için yüksek performanslı beton olarak tanımlanabilir. ACI, YDB' nu, bileşen, malzeme ve karışım oranlarının seçimi ile bir veya daha fazla spesifik özelliği sahip tasarlanmış bir beton olarak tanımlar. Bu tanım tek bir ürünü değil özellikleri yüksek işlenebilirlik, çok yüksek erken dayanım gibi belirli mühendislik ihtiyaçlarını karşılamak üzere uyarlanmış yüksek teknoloji beton ailesini kapsamaktadır. Bu betonlar aynı zamanda yüksek tokluk ve darbe dayanımına sahiptir (Mehta, 2004). Son yıllarda eskisinden çok daha fazla değişken içeren beton karışım problemi giderek daha karmaşık hale gelmiştir. YDB da dikkate alınması gereken birçok değişken vardır. Bu nedenle bileşenlerin ve bunların uygun oranlarının seçimi oldukça karmaşıktır (Kumbhar ve Murnal 2014). Ayrıca optimum karışım oranına ulaşmak için tüm muhtemel kombinasyonların deneme karışımlarını yapmaya yönelik geleneksel ampirik yaklaşımı kullanmak ekonomik değildir ve zaman alıcıdır (Kumbhar ve Murnal 2014). Bu nedenle, NDB karışımlarını tasarlamak için yaygın olarak benimsenen mevcut karışım tasarım yöntemlerinin prosedürleri, YDB karışımlarını tasarlamak için doğrudan uygulanamaz. YDB'nun karışım tasarımı, aşağıdaki nedenlerden dolayı normal betondan farklıdır.

- Su-bağlayıcı oranının çok düşük olması,
- Beton üretiminde, yüksek oranda taze ve sertleşmiş betonun özelliklerini değiştirecek bağlayıcı kullanılması,
- Yüksek oranda su azaltıcıların kullanılmasıdır (Kumbhar ve Murnal, 2014).

### **3.3. Mehta ve Aİtcin'e Göre Basitleştirilmiş Yüksek Dayanımlı Beton Tasarımı**

Mehta ve Aİtcin (1990); Basınç dayanımı 60 ile 120 MPa arasında değişen betonlar için basitleştirilmiş bir karışım yöntemi önererek bu yöntemin maksimum agrega boyutu 10 - 15 mm ve çökme değeri 200 -250 mm olan betonlar içinde uygun olduğunu

belirtmektedir. Mehta ve Aitcin'e (1990) göre YDB tasarım aşamaları Şekil 3.1' deki gibidir.



Şekil 3.1. Betonun basınç dayanımını etkileyen parametreler

- Dayanım ortalama 28 günlük basınç değeri 50 ile 120 MPa arasında olacak şekilde seçilmelidir,
- Su içeriği iri agrega maksimum boyutu 10 - 15 mm ve işlenebilirlik için süper akışkanlaştırıcı miktarı ayarlanarak çökme değeri 200 ile 250 mm olacak şekilde ayarlanmalıdır,
- Bağlayıcının seçimi YDB larda bağlayıcı hacminin toplam beton hacminin %35'i olduğu varsayımı ilkesi üzerinden yapılır. Bağlayıcı olarak %100 Portland çimentosu, %75 Portland çimentosu ve %25 uçucu kül veya yüksek fırın cürufu, %75 Portland çimentosu, %15 uçucu kül ve %10 silis dumanı harmanından uygun olanı seçilebilir,
- Agrega seçiminde toplam agrega hacminin beton hacminin %65'ine eşit olması ilkesi dikkate alınır,

- Betonun ağırlığı beton üretiminde kullanılan malzemelerin özgül ağırlıkları ile karışımındaki birim hacimlerinin çarpılmasıyla elde edilir,
- Süper akışkanlaştırıcı miktarının ayarlanması, ilk deneme karışımı için bağlayıcı miktarının %1 kadar süper akışkanlaştırıcı kullanımı önerilir,
- Su miktarı düzeltilmesi, süper akışkanlaştırıcıya dâhil edilen suyun hacmi hesaplanır ve ilk karışım suyu miktarından çıkarılır. Benzer şekilde, agreganın su emme miktarına göre su miktarında bir düzenleme yapılır,
- Deneme karışımında, YDB' da en önemli iki kriter olan işlenebilirlik ve dayanımı sağlayacak bir karışım oranı seçilir. Yapılan birçok varsayımdan dolayı, genellikle ilk deneme karışımının istenilen işlenebilirlik ve dayanımı sağlaması zordur, karışım oranlarında değişiklikler yaparak istenilen işlenebilirlik ve dayanımın elde edilmesine çalışılır.

### **3.4. Bağlayıcı Malzemeleri**

#### **3.4.1.Çimento**

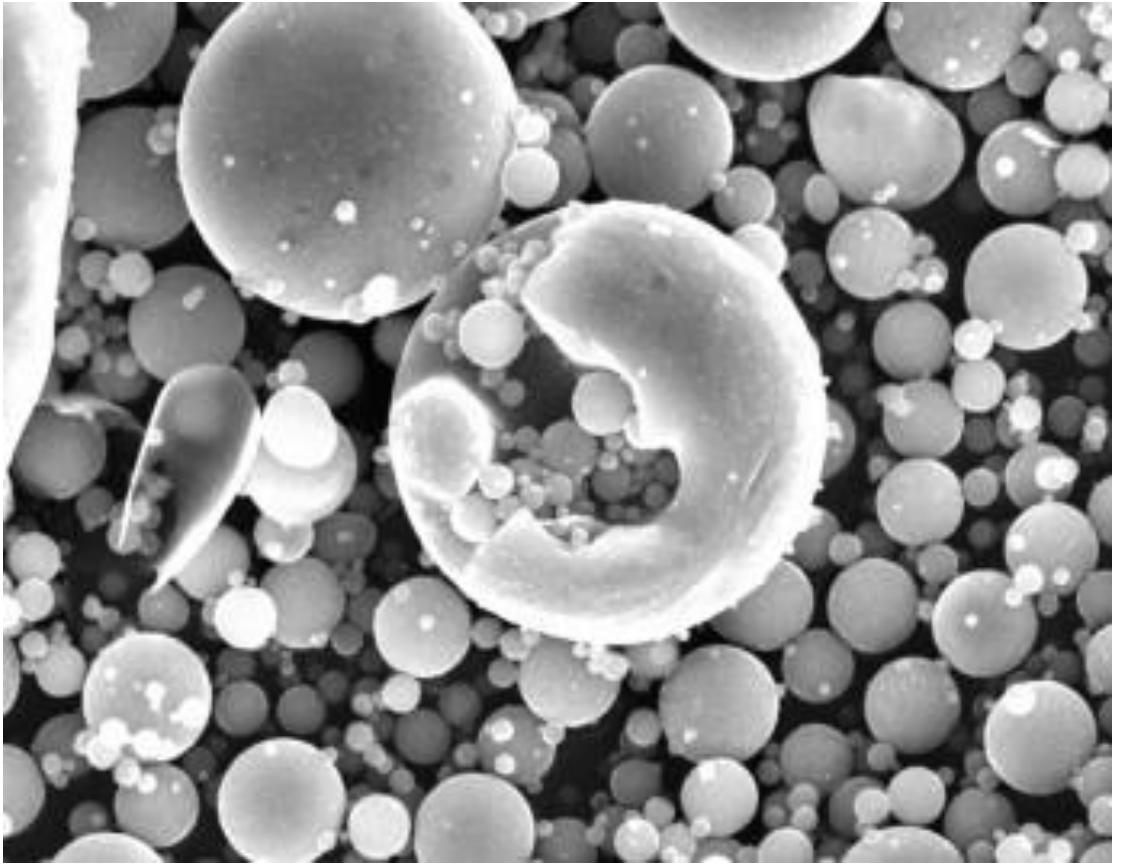
Çimento, ana bileşenleri kalsine kireç ve kilden yapılmış toz halinde bir maddedir. Kullanılan kil silika, alümina ve demir oksit sağlarken, kalsine kireç kalsiyum oksidi sağlar. Kalsinasyon işlemi sırasında fırında yüksek sıcaklıklarda, malzeme içerisindeki oksitler reaksiyona girerek daha karmaşık bileşikler oluşturur (Elimbi vd., 2011). İnşaatta kullanılan ondan fazla farklı tipte çimento vardır ve bunlar bileşimlerine göre farklılık gösterir ve farklı kullanımlar için üretilirler. Çimento üretim aşaması sırasında salgılanan gaz ve toz çevreyi kirletmektedir (Matschei vd., 2007). Beton karışımına giren tüm malzemeler gerekli olsa da çimento genellikle zincirin en hassas halkası olduğu için çoğu zaman en önemlisidir. Çimentonun işlevi, her şeyden önce, kum ve taşı birbirine bağlamak ve ikinci olarak, kompakt bir kütle oluşturmak için kum ve taş parçacıkları arasındaki boşlukları doldurmaktır ve bu, toplam beton karışımı hacminin sadece %20'sini oluşturur; keza çimento, bağlayıcı ortamın aktif kısmıdır ve beton karışımının bilimsel olarak kontrol edilen tek bileşenidir. Sıradan Portland Çimentosu, klinkerinin öğütülmesiyle üretilen ince bir tozdur ve en önemli çimento türüdür. Yüksek kaliteli kireçtaşı, modern ekipman kullanarak çimento kalitesini yükseltmek, daha iyi parçacık

boyutu dağılımı, daha ince öğütme ve daha iyi paketleme sağlamakla mümkün olmuştur. Çimento cinsi yanında çimento miktarı da beton kalitesini doğrudan etkiler (Dunuweera ve Rajapakse ,2018). Çimento dozajının hem mukavemet artırıcı hem de boşluk yüzdesini azaltıcı yönde etkisi vardır. Diğer yandan ekonomik nedenlerle çimento dozajı istenildiği kadar artırılamaz. Çimento dozajının yüksek oluşu yalnız betonun mekanik mukavemetini artırmakla kalmayıp, beton yapıyı daha homojen hale getirir ve böylece kapilarite yoluyla meydana gelen geçirimliliği de azaltır (Dhir vd., 2004).

### 3.4.2. Uçucu kül

İçinde bulunduğumuz büyüme ve gelişme çağında, tüm alanlarda gerçekleşen ilerlemenin yanı sıra insan doğayı görmezden gelmekte ve ona zarar vermektedir. Çimento gibi malzemeler, üretimi sırasında oluşan karbon salınımından dolayı küresel ısınma ve çevresel bozulma tehdidi oluşturmaktadır. İnşaat mühendisliğinin temel görevlerinden birisi de çevre için herhangi bir olumsuzluk oluşturmadan, ekonomik alt ve üstyapı oluşturmaktır (Anandan ve Manoharan, 2015). Araştırmacılar, sürdürülebilir bir çevre için çimentonun bir kısmının yerine uçucu kül, yüksek fırın cürufu, silis dumanı ve pirinç kabuğu gibi atık maddeler kullanarak betonda daha az çimento kullanımı konusuna yoğunlaşmışlardır. Bu bağlamda betonda uçucu kül kullanımı tüm dünyada teşvik edilmiş, Hindistan'da bazı bölgelerde uçucu kül kullanımına başlanmış olmasına rağmen çimentonun uçucu kül ile yer değiştirme yüzdeleri çok küçük seviyede kalmış ve kullanılan miktar üretilen toplam uçucu külün sadece %25'i seviyesinde kalmıştır (Saini ve Ashish, 2015). Uçucu kül içeren yüksek dayanımlı beton üretimi üzerinde geniş çapta araştırmalar yapılmış ve sahada başarıyla uygulanabilirliği görülmüştür. Bununla birlikte, priz özellikleri üzerindeki olumsuz etkileri ve dayanım kazanma hızındaki yavaşlama ikame oranını kısıtlamaktadır. Yüksek hacimde öğütülmüş uçucu kül içeren katkı çimentolar, nihai basınç dayanımlarında bir artış gösteriyor (Anandan ve Manoharan , 2015). Uçucu kül, yaklaşık 2.300 yıl önce bilinen en eski hidrolik çimentoların üretiminde kullanılan volkanik küllere çok benzer. İlk üretimi ismini "puzolan" terimine veren küçük İtalyan kasabası Puzolan yakınlarında yapıldı. Puzolan, kireç ve su ile karıştırıldığında çimentolu bir bileşik oluşturan silisli veya silisli/alüminli bir malzemedir. Uçucu kül dünyadaki en iyi bilinen ve en yaygın kullanılan puzolanlardan biridir. Uçucu kül tarım arazilerinin, yer altı ve yeryüzü sularının, toprak ve havanın kirlenmesi üzerindeki

olumsuz etkileri ile bilinen kömür bazı elektrik üreten termik santrallerin bir atığıdır. Oluşan bu atık malzemenin değerlendirilmesi için farklı yöntemler önerilmektedir (Saini ve Ashish, 2015). Uçucu külün en yaygın yeniden kullanım alanlarından biri çimento ve betondur (Anandan ve Manoharan, 2015). Şekil 3.2’de uçucu kül SEM görüntüsünde de görüldüğü gibi büyük küresel, parçacıklardan oluşan ince toz olarak da tanımlanabilir (Pati1 vd., 2012). Santrallerin baca gazlarından toz benzeri parçacıkların elektrostatik veya mekanik çökeltmesiyle elde edilir. Bu ürün puzolanik özelliklere sahiptir ve bu nedenle sadece atık malzeme olmayıp, betonun performansını iyileştirmek için de kullanılabilir.



**Şekil 3.2.** Uçucu külün SEM analizi görüntüsü

Uçucu külü beton için arzu edilen bir katkı maddesi yapan özellikler, düşük hidretasyon, çok ince olması, çimentodaki alkalileri azaltması, klorür ve sülfat penetrasyonuna karşı direnç oluşturması ve uzun süreli hidratasyon ve puzolanik reaksiyon yoluyla mikro yapısal gelişimin devam etmesi yoluyla betonun dayanıklılığını artırması sayılabilir (Saini ve Ashish, 2015). Uçucu külün çimentonun bir kısmına ikamesi, atık malzeme

miktarının azalmasını, daha temiz çevreye sahip olunmasını, enerji gereksiniminin azalmasını, uygun maliyetli yapıların inşasını, çevresel ve teknik faydalar temin etmektedir (Patil vd., 2012). Günümüzde yenilenebilir enerji kaynakları artmasına rağmen, bazı ülkelerde elektrik enerjisi üretimi için en iyi hammadde kömür kullanımındır. Termik santrallerinde elektrik üretiminde farklı kimyasal yapıya sahip kömür türleri vardır. Kömürün yanması sonucu silisli, kalkerli veya silis-kalkerli uçucu kül gibi farklı tipte uçucu küller atık olarak elde edilir. Uçucu kül, toz haline getirilmiş kömürün yakılmasından elde edilen, puzolanik ve hidrolik özelliklere sahip bir atık malzemedir. Uçucu kül kullanıldığında, puzolanik özelliğin yanı sıra taze ve sertleşmiş betonun bazı özelliklerinin de etkilenebileceğine dikkat edilmelidir (Longarini vd., 2014). Uçucu kül ve silis dumanı gibi maddelerin varlığı, çevre ve ekonomik açıdan ciddi bir sorun haline gelmiştir. Betonda çimentonun puzolanik malzemeye değiştirilmesi genellikle maliyet tasarrufu sağlar ve elde edilen ürüne özel mühendislik özellikleri kazandırır (Mehta, 2004). “Kömürle çalışan enerji santralleri çok büyük miktarlarda uçucu kül üretir ve dünyanın en büyük miktarda endüstriyel katı atığını üreterek ciddi atık sorunları yaratır. Uçucu kül, çimentonun bir kısmının yerine kullanılarak enerji sarfiyatını ve sera gazı emisyonlarını azaltır (Sharma vd., 2012).

#### **3.4.2.1. Uçucu kül faydaları**

Uçucu kül betona, ekonomik ve çevresel avantajlar kazandırır, ayrıca betonun dayanım ve durabilitesini artırır. Hindistan'da şu anda üretilen uçucu külün %50'sinden daha azı tüketilmektedir (Longarini vd., 2014). En popüler yapı malzemesi olan çimento, dünyadaki toplam karbondioksit emisyonlarının %7'sinin sebebidir. Atmosferdeki karbondioksit, çevrenin küresel ısınmasına neden olan ana tehdittir. Çevredeki CO<sub>2</sub> emisyonlarını mümkün olan oranda azaltmak için dünya genelinde bir çalışma başlatılmıştır (Patil vd., 2012). Betonda veya çimentoda uçucu kül kullanımı çimento tüketimini azaltmak için yapılan çalışmalardır. Bu çalışmalara göre uçucu külün beton veya çimentoda kullanımının sağladığı faydaları aşağıdaki gibi sıralamak mümkündür:

- Termik santrallerinde üretilen büyük miktarlardaki uçucu külün çevresel bozulmaya etkilerini azaltmak,

- Yüksek performanslı (YPB) ve normal betonun özelliklerinin  $\text{Ca(OH)}_2$  ile puzolanik reaksiyona girerek daha fazla kalsiyum-silikat-hidrat (C-S-H) üretilmesi ile iyileştirilmesini sağlamaları,
- Boşlukları doldurmasıyla daha yoğun betonun oluşumunu sağlamaları (Saini ve Ashish, 2015).

### 3.5. Katkı Malzemeleri

#### 3.5.1. Süper akışkanlaştırıcı

Süper akışkanlaştırıcılar, su molekülünden yüzlerce kat daha büyük olan çözünür makro moleküllerdir. Süper akışkanlaştırıcıların, beton işlenebilirliğini azaltacak olan çimento yapısında  $\text{C}_3\text{A}$  ile sabitlenmemesi sağlanmalıdır. Betonun priz alma süresi kimyasal reaksiyonuna göre bir saat önceye kadar hızlandırılabilir ya da bir saat sonra ertelenebilir (He ve Wang, 2007). Gecikme bazen 4 -30  $\mu\text{m}$  arasındaki çimento partikül aralığıyla ilişkilidir. Süper akışkanlaştırıcıların kullanımı, suyun yüzey gerilimini önemli ölçüde etkilemez ve önemli miktarda hava sürüklemeyi önler. Süper akışkanlaştırıcı kullanımının ana dezavantajı, hızlı slump kaybı ve çimento ile süper akışkanlaştırıcıların uyumsuzluğu sonucu işlenebilirlik kaybıdır (Noorzyafiqi vd., 2021). Süper akışkanlaştırıcı katkıları yüksek performanslı betonların s/ b oranlarını, çok yüksek basınç dayanımı sağlayacak şekilde düşürmektedir. Akışkanlığı kendiliğinden seviyeleme oluşturacak kadar yüksek olup, ayrılmaya neden olmamak için idealdir. Dört ana süper akışkanlaştırıcı ailesi vardır.

- Naftalin ve formaldehidin polikondensatının sülfonatlanmış tuzları, genellikle polinaftalin sülfonat veya daha basit olarak naftalin süperplastikleştiricileri,
- Melamin ve formaldehit polikondensatının sülfonatlanmış tuzları, genellikle polimelamin sülfonat veya daha basit olarak melamin süperplastikleştiriciler,
- Çok düşük şeker ve düşük yüzey aktif madde içerikli ignosülfonatlar,
- Poliakrilatlar (Aİtcin, 2007).

Süper akışkanlaştırıcı kullanım nedeni; daha düşük s/b oranı, düşük geçirimsizlik, daha az bağlayıcı (çimento, uçucu kül, silis dumanı...), daha yüksek dayanım elde edebilmek için

bağlayıcı ağırlığının %0,8 ile %1,5'i oranında kullanılması önerilir (Aİtcin, 1998). Optimum katkı dozu, kullanılan bağlayıcı ve agrega kalitesine, su/bağlayıcı oranına ve ortam sıcaklığına bağlı olarak değişir. Yüksek dayanımlı beton, normal dayanımlı betonun yetersiz geldiği yüksek dayanım gerektiren yapılarda kullanılır. Tercihen beton içerisinde kullanılan suyun beton katkısı ile birlikte verilmesi daha da iyi sonuçlar verir (He ve Wang, 2007 ). Beton mikseri hızlı devrinde 3 dakika karıştırılır. Şantiyede, dozajı ayarlanmış olan katkı miktarı beton mikserinin üzerinden beton içerisine boşaltılır. Beton mikseri hızlı devrinde 5 dakika karıştırılır. Karışım suyu hazırlanmış betona su verilmez. Her verilen 10 lt su beton basınç dayanımını 10 kg/cm<sup>2</sup> düşürür (Aİtcin, P.C.2007). Süper akışkanlaştırıcı kullanımının sağladığı faydalar aşağıda belirtilmiştir.

- Su içeriğini artırmadan ve ayrıştırma riski olmaksızın akışkanlığı önemli oranda artırır
- Betonda ayrışma azaltır,
- Uzun süreli kıvam koruma,
- Betonun 7 ve 28 günlük dayanımlarını artırır,
- Yüzey görünümünü iyileştirir,
- Betonun yerine yerleştirilmesini kolaylaştırır, vibrasyon ve işçiliği azaltır.

***Yüksek oranda su azaltıcı özelliği;***

- Son dayanımlarda önemli artış sağlar,
- Su miktarını önemli oranda azaltır,
- Betonun su geçirimsizliğini artırır,
- Büzülme ve sünmeyi azaltır.

#### 4. MATERYAL ve YÖNTEM

Birinci bölümde açıklandığı gibi bu çalışmanın amacı; son yıllarda Erzincan'da beton santrallerinde kullanılmaya başlanılan Elma köy kırma taş agregasını kullanılarak Yüksek Dayanımlı Betonun üretilebilirliğinin araştırılması, üretilen betonların bazı mekanik ve fiziksel özelliklerini belirlemektir.

##### 4.1. Materyal

###### • *Agrega*

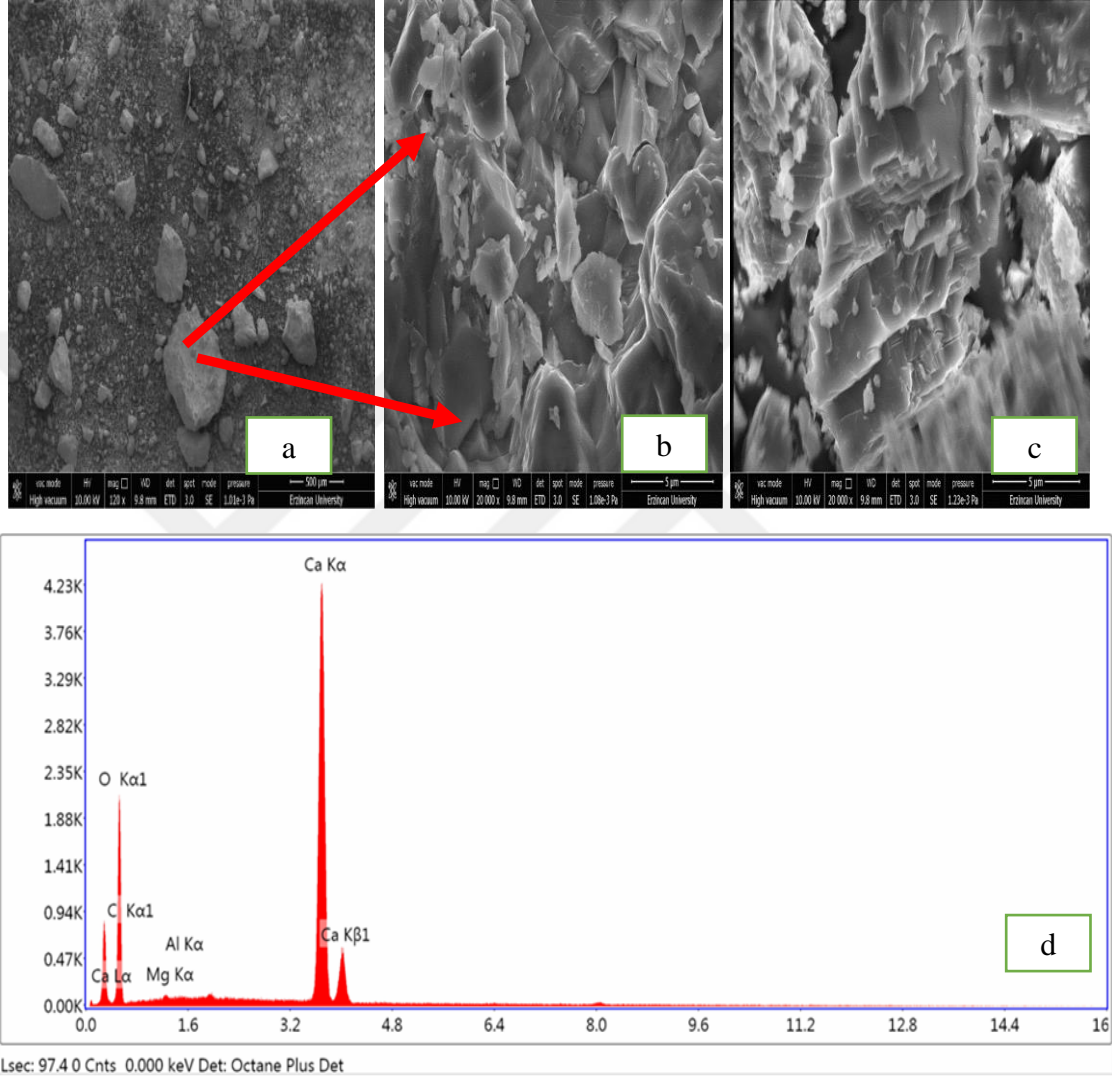
Agregalar, bir beton karışımının % 60 ile % 75 ini oluşturmaktadır (Albarwary vd., 2017). Elde edilen karışımın yoğunluğunu arttırmak için agregalar sıklıkla iki veya daha fazla boyutta kullanılır (Beshah, 2019). İnce agreganın en önemli işlevi işlenebilirlik ve homojenlik sağlamaktır. Basınç dayanımı arttıkça, iri agregalara etkiyen yük aşırı derecede artmakta ve üzerinde veya çevresinde yüksek basınç altında kırılmayı başlatan zafiyet oluşmaktadır (Aİtcin, 2007). Bu sebeple iri agregalar yüksek dayanımlı betonda en zayıf halkayı oluşturmaktadır. Bu zafiyeti azaltmak için betondaki maksimum agrega boyutu ve s/b oranı mümkün olan oranda düşük tutulmalıdır (Ding vd., 2012). Bu çalışmada Erzincan Elma köy taş ocağından alınan agrega kullanılmıştır. Şekil 4.1 ' de görüldüğü gibi maksimum boyutu  $D_{max}$  16 olan agrega kullanılmıştır.



Şekil 4.1. Karışımda kullanılan agregaların görünümü

Betonun ana bileşeni olan agreganın olumsuz etkilerinin yanı sıra betonun güvenliği üzerinde de önemli etkileri olan fonksiyonlara sahiptir (Aİtcin,1998). Şekil 4.2'de agrega

partikülünü gösteren mikrograf (a,b,c) FESEM ve (d) EDS analizleri görülmektedir. Ancak beton araştırıldığında, alkali-aktif silika, karbonat, sülfat ve klorür gibi agregada tehlikeli bileşikler oluşturan bazı minareler, betonun genel dayanıklılığına ciddi şekilde zarar verdiği ortaya çıkmaktadır (Neville, 1995).



**Şekil 4.2.** Agregada partikülünü gösteren mikrograf (a,b,c) FESEM ve (d) EDS Sonuçları.

Bu nedenle beton karıştırılırken, agregada ile ilgili tehlikeli minareler ortadan kaldırılmalıdır. Betonun dayanıklılığını artırmak için karıştırma sürecinde maksimum olumsuz reaksiyonların oluşmasını önlemek amacıyla bazı önlemler alınmalıdır. (Ding vd., 2012). Tablo 4,1’de görüldüğü gibi çalışmada kullanılan agregada kimyasal analiz sonucuna göre kalsiyum karbonattan ( $\text{CaCO}_3$ ) diğer bir deyişle kireçtaşından oluşmaktadır.

**Tablo 4.1.** Agrega kimyasal analizi sonuçları

Eleman	Ağırlık	Atomik %	Net Int	Hata %
C	10,75	17,51	69,97	7,81
O	52,88	64,64	242,48	10,18
Mg	0,28	0,23	6,76	24,24
Al	0,08	0,06	2,48	63,97
Ca	36,01	17,57	940,12	1,66

Ding vd., (2012) , göre  $\text{CaCO}_3$  kireç taşı içerisinde betonda olumsuzluk oluşturacak mineral bulunmamaktadır. Dolayısıyla agrega içerisinde betona zarar verecek bir kimyasal minarel bulunmadığından, seçilen agreganın mineral yapı bakımından beton üretimi için uygun olduğu söylenebilir.

#### • Çimento

Beton dayanımını etkileyen en önemli parametrelerden biri çimentonun kalitesidir (Neville,1995). Yapılan çalışmalarda yüksek dayanımlı beton üretiminde genellikle yüksek dayanımlı çimento kullanılmaktadır (Aitcin, 1998). Bu çalışmada yöresel malzemelerin kullanımına özen gösterildiği için temini kolay olan CEM 42,5 çimento kullanılmıştır. Ayrıca Türkiye'deki çimento fabrikalarında CEM I 52,5 gibi yüksek dayanımlı çimentolar talep üzerine üretilmekte ve her zaman bulunmamaktadır. Şekil 4,3 'te görüldüğü üzere, çalışmada Aşkale çimento fabrikasında üretilen CEM I 42,5 R tipi çimento kullanılmıştır. Bu çimentonun kullanım nedeni; çalışmanın bölgesel olması ve bu bölgedeki çimento fabrikalarında CEM I 42,5 tipi çimentoların yaygın olarak üretilmesidir.



**Şekil 4.3.** Aşkale çimentosu görüntüsü

Bu çalışmada kullanılan çimentonun özellikleri Tablo 4.2’de görülmektedir. Çimentoların özellikleri; ham maddenin özelliği, pişirilme ve sıcaklığı ve öğütülme inceliğine bağlı olarak değişmektedir. Bu nedenle standartlara uygun çimento üretimi çok sıkı denetim ve kontrolü gerektirmektedir.

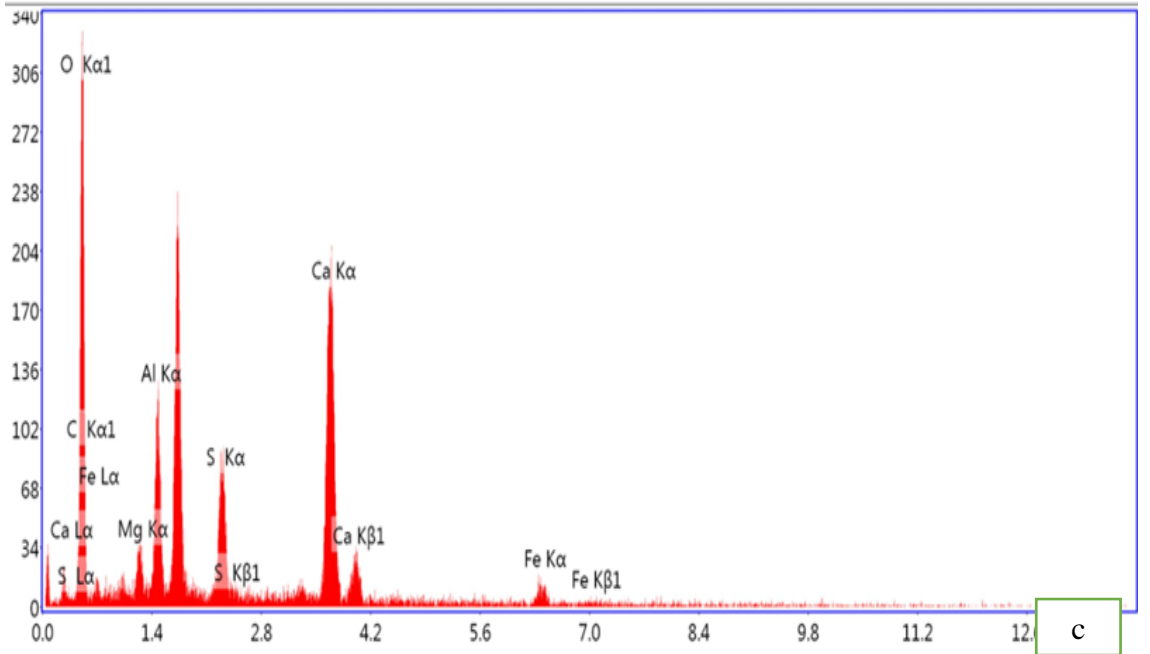
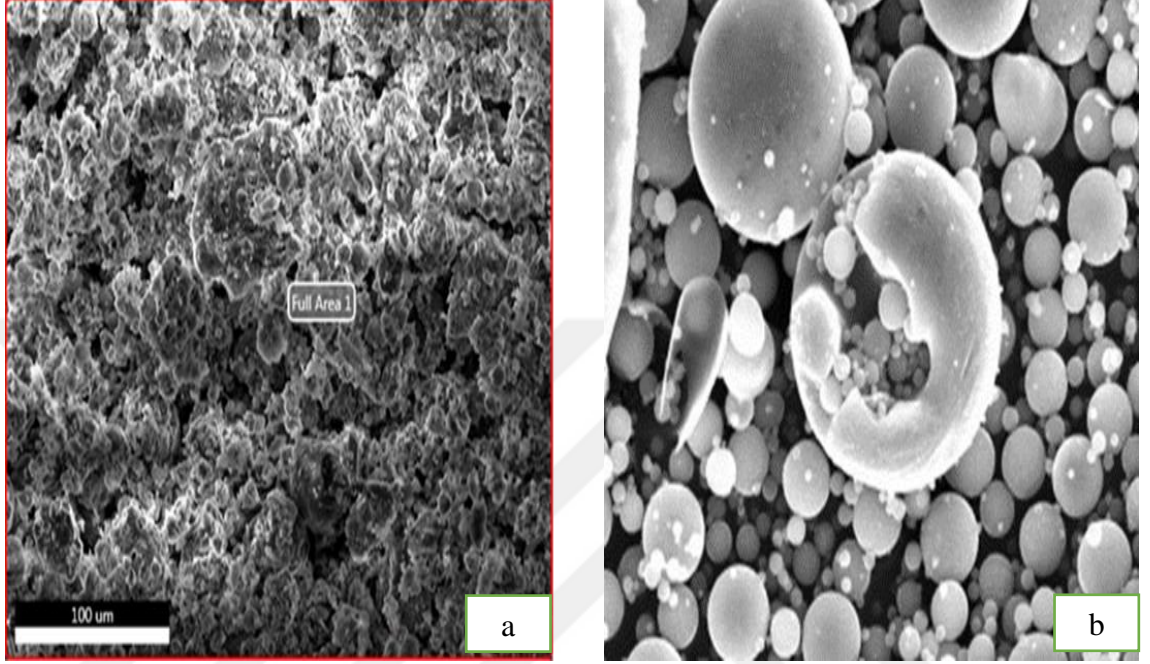
**Tablo 4.2.** CEM I 42.5 R çimentosunun özellikleri

Kimyasal analiz	TS EN 197-1 :2012 Standart sınır	Fiziksel ve Mekanik Testler	TS EN 197-1 :2012 Standart sınır
SiO <sub>2</sub>	18,10	(incelik )	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,48	(45µm test elek kalıntısı %)	7,18
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,09		
CaO	63,65	(özgül ağırlık)(g/cm <sup>2</sup> )	3,12
MgO	2,58		
SO <sub>3</sub>	2,84	Max : %4	(özgül ağırlık)(g/cm <sup>2</sup> )
Ateşleme kaybı	3,90	Max : %5	İlk Ayar Süresi (saat-dakika) 2saat- 31 dakika Min:60 dakika
Na <sub>2</sub> O	0,21		Son Ayar Süresi (saat-dakika) 3ho- 11 dakika
K <sub>2</sub> O	0,62		
(Na <sub>2</sub> O): Na <sub>2</sub> O+0,656*K <sub>2</sub> O (klorür)	0,62 0,015	Max:% 0,1	Hacim İfadesi (mm) 1,0 Max:10 mm
Ölçülmemiş	0,52	Erken dayanım 2day (Mpa)	27,90 Min :20 Mpa
Toplam	100	Basınç Dayanımı 28 gün	58,00 Mpa Min :42,5Mpa Max:62,5Mpa
(Özgür Cao)	0,44		
Çözünmeyen Kalıntı	0,55	Max :%5	Su İhtiyacı Çimentodan % 29,5%

• **Uçucu kül**

Bu çalışmada; Kangal Termik Santrali uçucu külü, TS EN 197-1’e göre reaktif kireci %10’un üzerinde olduğu için kalkerli uçucu kül (f) sınıfına girmektedir.

$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  miktarı, TS 639'a göre  $> \% 70$  sağlamamakta; ancak ASTM C 618'e göre  $\text{S} + \text{A} + \text{F} > \% 50$  olduğu için bu kül C sınıfı (yüksek kireçli) uçucu kül kapsamına girmektedir. Şekil 4.4 'de SEM görüntüsünden görüldüğü gibi, uçucu kül büyük parçacıklardan oluşan ince toz olarak da tanımlanabilir.



**Şekil 4.4.** Kangal termik santralinden uçucu külün mineral yapısını gösteren mikrogram (a,b)FESEM ve (c) EDS sonuçları.

Uçucu kül kimyasal Analizi Sonuçları, yüksek kireçli uçucu kül ( $\text{CaO} > \%10$ ) olduğu için serbest kireç miktarı ortalamada  $\%7,65$  olup, TS EN 450’de verilen  $\%1,0$  sınırının üzerindedir. Sonuç olarak; Kangal uçucu külünün kimyasal bileşim açısından TS EN 197-1,F sınıfı koşullarını tamamıyla sağladığı ASTM C 618 ve TS EN 450’de  $\text{SO}_3$  yüzdesi dışında diğer sınırlara uyduğu, TS 639’a göre kısmen (S+A+F ve  $\text{SO}_3$  dışında) uygun olduğu tespit edilmiştir (Türker vd., 2009). Tablo 4.3’de görüldüğü gibi uçucu külde yüksek oranda Al ve Si bulunmaktadır, bu maddeler CaO ile reaksiyona girerek Kalsiyum-Silikatı, Alüminyum ile reaksiyona girerek Kalsiyum Alüminatı oluşturmaktadır. Bu durum da beton dayanımının artmasına katkı sağlamaktadır.

**Tablo 4.3.** Uçucu kül kimyasal analizi sonuçları

Element	Ağırlığı	Atomik	Net Int	Hatta	K oranı	Z	R	A	F
	%	%	%	%					
C	2,09	3,78	1,39	28,46	0,01	1,13	0,94	0,28	1
O	50,17	68,21	53,64	10,86	0,13	1,07	0,96	0,24	1
Mg	1,65	1,48	5,75	17,84	0,01	0,99	0,99	0,57	1,01
Al	6,05	4,88	24,16	8,63	0,04	0,95	1	0,7	1,01
S	5,90	4,00	22,67	9,90	0,05	0,95	1,02	0,91	1,03
Ca	28,45	15,44	63,35	4,13	0,26	0,91	1,04	0,99	1,02
Fe	5,69	2,22	4,58	25,57	0,05	0,8	1,05	0,99	1,05

• **Süper akışkanlaştırıcı**

Yüksek dayanımlı betonlarda dayanımın etkilendiği en önemli parametre s/b oranıdır. Su miktarını azaltarak, çimento hamurunun daha yüksek yoğunluğa ve daha yüksek kaliteye sahip olması sağlanır (Aİtcin, 1988). Tablo 4.4’ de Süper Akışkanlaştırıcı kimyasal Analizi ve bazı mekanik özellikleri, betonda düşük s/b oranı ile istenilen işlenebilirliği sağlamak için yüksek oranda akışkanlaştırıcı kullanılmalıdır (Neville, 1995., Aİtcin, 1998). Bir beton karışımındaki su miktarı, çimentonun hidratasyon işlemini

tamamlaması ve betonun taşınıp yerine yerleştirilip mastarlanması için yeterli işlenebilirliğe sahip olmasını sağlamalıdır (He ve Wang, 2007).

**Tablo 4.4.** Süper akışkanlaştırıcı özellikleri

Kimyasal Yapısı	Sodyum Naftalin Sülfonat esaslı	
Renk	Açık kahverengi likit	
Katı Madde Oranı	40± % 2	EN 480-8
PH ( %2 çözelti)	6,5 – 9	ISO 4316
Sodyum Sülfat İçeriği	0,5 %	
Viskozite	35 cP (24°C)	
Özgül Ağırlık	1,20 gr/cm <sup>3</sup> ± 0,05	ISO 758

#### • Su

Beton karışımında suyun iki temel görevi vardır. Bunlardan biri betonun işlenebilirliği için gerekli olan kıvamı, diğeri ise çimentonun hidrasyonunu sağlamaktır (Verma ve Mir, 2016). Bu nedenle beton yapımında ve bakımında kullanılacak su temiz olmalı ve içerisinde taze ve sertleşmiş betonun özelliklerine zarar verebilecek miktarda kil, organik madde, silt, sülfat ve yabancı madde bulunmamalıdır (Neville, 1995). Bu etkiler dikkate alınarak bu çalışmada karışım ve bakım suyu olarak Erzincan şehir içme suyu kullanılmıştır.

## 4.2.Yöntem

### 4.2.1. Agreganın fiziksel özellikleri

Bu çalışmada kullanılan agregaların özgül ağırlıkları ile su emme deneyleri; TS EN 1097-6 (2013) standardına uygun olarak yapılmıştır. Agregaların kuru özgül ağırlık, doymun özgül ağırlık, görünür özgül ağırlık ve su emme oranları TS EN 1097-6 ya göre belirlenmiştir.

#### 4.2.1.1. İri agreganın özgül ağırlığı

Çalışmada deneye tabi tutulacak iri agrega 48 saat suda bekletildikten sonra sudan çıkarılarak kuru bir havlu üzerine konularak yüzey suyu alınmış ve hassas terazide tartılmıştır. Sonrasında doygun yüzey kuru ağırlığı belirlenmiştir. Doygun kuru yüzeydeki agrega arşimet terazisindeki tel sepetin içerisine konularak tartılır ve agreganın su içerisindeki ağırlığı belirlenmiş, daha sonra agrega etüve konularak değişmez ağırlığa kadar kurutulmuş ve hassas terazide tartılarak agreganın kuru ağırlığı belirlenmiştir. Tablo 4.5 ve Tablo 4.6’da görüldüğü gibi iri agrega bazı fiziksel özellikleri hesaplanmıştır.

**Tablo 4.5.** İri agreganın özgül ağırlığı (4-8 mm )

İri agrega için özgül ağırlık (4-8 mm)	
Kuru ağırlığı (gr)	1687,3
Kuru doygun yüzey ağırlığı (gr)	1700
Su miktarı (gr)	1064,8
Su emme oranı % =	0,75
Agrega özgül ağırlığı =	2,65 gr/cm <sup>3</sup>

$$Su\ emme\ oranı\ \% = \frac{Ağırlık\ kuru\ doygun\ yüzey - Ağırlık\ kuru}{Ağırlık\ kuru} \quad (4.1)$$

$$= \frac{1700 - 1687.3}{1687.3} \times 100 = 0.75$$

$$V_{agrega} = kuru\ doygun\ yüzey\ ağırlığı - Su\ miktarı \quad (4.2)$$

$$= 1700 - 1064.8 = 635.2$$

$$\gamma_{agrega} = \frac{kuru\ ağırlığı}{V_{agrega}} \quad (4.3)$$

$$= \frac{1687.3}{635.2} = 2.65\ gr/cm^3$$

**Tablo 4.6.** İri agreganın özgül ağırlığı (8-16 mm )

İri agreganın için özgül ağırlık: 8-16 mm	
Ağırlık kuru	1937,3
Ağırlık kuru doygun yüzey	1945,3
Su miktarı	1218,1
Su emme oranı %	0,41
Agrega özgül ağırlık	2,66 gr/cm <sup>3</sup>

$$Su\ emme\ oranı\ \% = \frac{Ağırlık\ kuru\ doygun\ yüzey - Ağırlık\ kuru}{Ağırlık\ kuru} \quad (4.4)$$

$$= \frac{1945.3 - 1937.3}{1937.3} \times 100 = 0.41$$

$$V_{agreg} = Ağırlık\ kuru\ doygun\ yüzey - Su\ miktarı \quad (4.5)$$

$$= 1945.3 - 1218.1 = 727.2\ dm^3$$

$$Y_{agrega} = \frac{Ağırlık\ kuru}{V_{agrega}} \quad (4.6)$$

$$= \frac{1937.3}{727.2} = 2.66\ gr/cm^3$$

#### 4.2.1.2. İnce agreganın özgül ağırlığı

İnce agreganın özgül ağırlık deneyi için, ince agreganın doygun kuru yüzey haline getirilir. Agreganın doygun kuru yüzeye getirilmesi için Abraham hunisinden yararlanılmıştır. Doğru nem oranını yakalayabilmek için, agreganın su püskürtülerek ıslatılır veya sıcak hava üfleleyen fan ile kurutulur. Doygun kuru yüzey kıvamı yakalanmış agregadan piknometre içerisine alt çizgiyi geçmeyecek miktarda alınarak hassas tartım gerçekleştirilir. Tartılan doygun kuru yüzey ince agreganın madde kaybı yaşanmaksızın süzgeç kâğıdına konularak etüvde 15 dakika kurutulur ve yeniden tartılır. Çalışmamızda Şekil 4.5'te görüldüğü gibi, ince agreganın özgül ağırlığının tespitinde kullanılan Şişe Piknometre işaretli seviyeye kadar su doldurulup tartım alınmıştır. Hassas biçimde tartılan kuru agreganın piknometreye konularak işaretli seviyeye kadar su doldurulmuş, kum ve su karışımını sallanarak hava kabarcıklarının su ve kum karışımından uzaklaşması sağlanmıştır. Eksilen su miktarı taksim çizgisine tekrar ilave edilerek ağırlık ölçümü yapılmıştır. Tablo 4.7' de görüldüğü

gibi ince agrega bazı fiziksel özellikleri hesaplanmıştır. Gerek görüldüğü durumunda vakum uygulanarak agregalar arasındaki havanın tamamının çıkması da sağlanabilir.



Şekil 4. 5. İnce agrega özgül ağırlık deneyi

Tablo 4.7. İnce agrega özgül ağırlık özellikleri

İnce agrega için özgül ağırlık: 0-4 mm	
Piknometre ağırlığı (gr)	87,3
Kuru kum ağırlığı (gr)	242,40
Piknometre + Su miktarı (gr)	423,5
Piknometre + Doygun yüzey kuru kum ağırlığı (gr)	333
Piknometre + Doygun yüzey kuru kum + Su miktarı (gr)	572,5
Su emme oranı %=	1,3
Agrega özgül ağırlık =	2,59 gr/cm <sup>3</sup>

$$Y_{\text{agrega}} = \frac{(\text{Piknometre ağırlığı} + \text{Kuru kum ağırlığı} - \text{Piknometre Ağırlığı}) - \text{Kuru kum ağırlığı}}{\text{Kuru kum ağırlığı}} \quad (4.7)$$

$$= \frac{(333-87.3)-242.4}{242.4} \times 100 = 1.3$$

$$Y_{\text{agrega}} = \frac{\text{Kuru kum ağırlığı}}{\text{Kuru kum ağırlığı} - (\text{Piknometre ağırlığı} + \text{Kuru kum ağırlığı} + \text{Su miktarı} - \text{Piknometre Ağırlığı} + \text{Su miktarı})} \quad (4.8)$$

$$= \frac{242.4}{242.5 - (572.5 - 423.5)} = \frac{242.5}{93.5} = 2.59$$

#### 4.2.1.3. Agregada granülometrisi

Agregalar beton hacminin %60 ile %75'ini oluşturur. Dolayısıyla betonun mekanik özellikleri üzerinde en etkili parametrelerden biridir(Neville, 1995). Daha büyük agregada parçacıkları içeren beton karışımları, daha küçük agregada içerenlere göre daha az karışım suyuna ihtiyaç duyar (Albarwary vd., 2017). Daha küçük agregada içeren betonlar daha büyük aderans yüzeyine sahip oldukları için daha yüksek basınç dayanımı gösterebilirler (Albarwary vd., 2017). Genel olarak maksimum agregada boyutu azaldıkça, betonun basınç dayanımında bir artış eğilimi olduğu görülmüş ve maksimum agregada boyutunun beton dayanımı üzerinde kuvvetli bir etkisinin olduğu sonucuna varılmıştır (Aİtcin, 2007). Belirli bir mukavemet için, çimento miktarını azaltarak ve uygun bir agregada boyutu kullanarak ekonomik bir karışım üretilebilir (Anıl, 2019). Bu çalışmamızda karışımların tamamında agregada granülometrisi Tablo 4.8 'de Fuller bağıntısına göre belirlenmiş, maksimum agregada boyutu, beton santrallerinde kullanılan elek çapları dikkate alınarak 16 mm seçilmiştir.

$$P = \sqrt{\frac{d}{D_{max}}} * 100 \quad (4.9)$$

Burada:

P = Kümülatif geçen, %

d = Hesap elek boyutu, mm

$d_{max}$  = En büyük tane boyutu, mm

$D_{max}$  = 16

$$P = \sqrt{\frac{d}{D_{max}}} * 100 ; P_{16} = \sqrt{\frac{16}{16}} * 100 = 100 ; P_8 = \sqrt{\frac{8}{16}} * 100 = 70 ; P_4 = \sqrt{\frac{4}{16}} * 100 = 50 ;$$

$$P_0 = \sqrt{\frac{0}{16}} * 100 = 0$$

**Tablo 4.8.** Agregada granülometrisi fuller bağıntısı

$D_{max}$	16	8	4
P%	100	70	50

$$P_{16} - P_8 = 100 - 70 = 30\% ; P_8 - P_4 = 70 - 50 = 20\% ; P_4 - P_0 = 50 - 0 = 50\% .$$

$$\gamma_{\text{özümlü ağırlığı}} = \frac{1}{\frac{\text{ince agrega oranı \%}}{\gamma_{\text{ince agrega}}} + \frac{\text{iri agrega 1 oranı \%}}{\gamma_{\text{iri agrega 1}}} + \frac{\text{iri agrega 2 oranı \%}}{\gamma_{\text{iri agrega 2}}}} \quad (4.10)$$

$$= \frac{1}{\frac{50\%}{2.598} + \frac{20\%}{2.656} + \frac{30\%}{2.66}}$$

$$\gamma_{\text{karışımın özümlü ağırlığı}} = 2.638$$

#### 4.2.2. Taze betonun birim ağırlığının belirlenmesi

Bu çalışmada taze betonun birim hacim ağırlığı ASTM C 138' göre belirlenmiştir. Deneyden önce birim ağırlık kovanın ağırlığı ve hacmi ölçülmüş. Daha sonra birim ağırlık kovası üç eşit tabakada doldurulmuş ve her tabaka ayrı ayrı şişleme çubuğuyla 25 kez şişlenmiştir. Sıkıştırma sonrası huni üst yüzeyi ile beton yüzeyi aynı olacak şekilde düzeltme yapılmıştır. Deneyin yapılış ve ölçümünde ASTM C 138' dikkate alınarak betonun taze birim hacim ağırlığı bulunmuştur.

#### 4.2.3. Beton karışım hesabı ve malzeme oranlarının belirlenmesi

Yüksek dayanımlı beton karışım yöntemlerinde genellikle varsayımlar yapılarak bir deneme karışımı yapılır. Daha sonra sonuçlarına göre karışım oranları değiştirilerek istenen özelliklere sahip beton üretilir (Jones ve McCarthy, 2005). Karışımlarda çimentonun bir kısmı farklı oranlarda uçucu kül ile değiştirilerek taze ve sertleşmiş betonun özelliklerindeki değişim incelenir. Karışım tasarımının bir sanat olduğu gerçeğine rağmen, bazı temel bilimsel ilkelerin hesaplamalar için temel olarak kullanılması gerekir (Bharatkumaranaiik vd., 2017). Yüksek dayanımlı betonun (YDB) karışım hesabı, bu betonlarda su-bağlayıcı oranının çok düşük olması ve taze ve sertleşmiş betonun özelliklerini büyük ölçüde değiştiren çimentonun ikame malzemesi içermesi gibi nedenlerden dolayı normal betondan farklıdır (Aİtcin, 1998). Bu çalışmada; dayanımın s/b ve çimento miktarına bağlı değişimini görmek için üç farklı s/b ve beş farklı çimento dozajında (400 kg/m<sup>3</sup>, 450 kg/m<sup>3</sup>, 500 kg/m<sup>3</sup>, 550 kg/m<sup>3</sup> ve 600 kg/m<sup>3</sup>) karışımlar hazırlanmıştır. Tablo. 4.9'dan, karışım malzeme miktarı verilmiştir. Agrega olarak maksimum tane boyutu 16 mm ve Fuller bağıntısını sağlayan granülometri kullanılmıştır.

Süper akışkanlaştırıcı olarak polikarboksilik eter esaslı yüksek oranda su azaltıcı katkı, bağlayıcı ağırlığının %0,8 - %1,3 oranlarında kullanılmıştır.

**Tablo. 4.9.** Karışımlardaki malzeme miktarları

K.NO	S/B	Su (kg)	Çimento (kg)	Uçucu kül (%)	Uçucu kül (kg)	İnce agrega (kg)	İri agrega (kg) 4-8mm	İri agrega (kg) 8-16mm	S.A (%)	S.A (kg)
1	0,4	264	600	10	60	720	432	388	1,4	9,24
2	0,4	180	540	10	60	830	498	332	1,1	7,26
3	0,3	180	540	10	60	811	495	365	1,1	6,6
4	0,4	220	500	10	50	800	480	360	1,4	5,6
5	0,35	193	500	10	50	820	512	385	1,4	6,3
6	0,4	200	450	10	50	833	520	363	1,4	7,0
7	0,4	160	340	15	60	925	555	370	1,4	5,6
8	0,4	180	383	15	68	894	536	358	1,4	6,3
9	0,4	160	380	5	20	943	566	377	1,4	5,6
10	0,4	180	423	5	23	894	536	357	1,4	6,3
11	0,4	200	475	5	25	833	545	368	1,4	7,0
12	0,4	200	425	15	75	843	550	353	1,4	7,0
13	0,4	220	468	15	83	820	492	328	1,4	6,3
14	0,4	220	523	5	28	820	502	330	1,4	6,6

Üretilecek betonda istenilen işlenebilirliği ve dayanımı elde edebilmek için üç farklı (0,3, 0,35 ve 0,40) s/b oranı kullanılmıştır. Elde edilen taze ve sertleşmiş betonların fiziksel ve mekanik özelliklerini belirlemek için gerekli testler yapılmıştır. Uçucu külün etkisini belirlemek için bazı karışımlarda çimento miktarının %5, %10 ve %15 ile yerine uçucu kül ikame edilmiştir.

#### **4.2.4. Sertleşmiş betonun birim ağırlarının belirlenmesi**

Sertleşmiş betonun birim ağırlık ve su emme oranları ASTM C567 / C567M – 19 ‘ye göre belirlenmiştir. Önce numuneler etüvde  $105\pm 5C^0$  değişmez ağırlığa kadar kurutuldu. Numuneler terazide tartıldıktan sonra, 48 saat suda bekletilerek boşlukların su ile dolması sağlanmış; suya doymuş hale gelen numuneler, yüzeyleri silinerek tartılıp doymuş kuru yüzey ağırlıkları belirlenmiştir. Daha sonra doymuş kuru yüzey halindeki numuneler suda tartılarak, sudaki ağırlıkları belirlenmiş, elde edilen veriler kullanılarak betonun birim ağırlıkları ve su emme oranları ASTM C567 / C567M – 19’a göre hesaplanmıştır.

#### **4.2.5. Yüksek dayanımlı beton üretimi**

Miksere sırasıyla su, super akışkanlaştırıcı, çimento ve agrega eklenip mikserde 3 dakika karıştırıldıktan sonra mikser durdurulup, 2 dakika beklendikten sonra mikser tekrar 5 dakika daha çalıştırılarak beton karışım işlemi tamamlanmıştır. Karışım işleminden sonra betonun kıvamını belirlemek için Abraham hunisi kullanılarak çökme değeri belirlenmiş, deney sırasında Abraham hunisi 3 eşit tabakada doldurulmuş ve her tabaka 25 kez şişlenmiştir. Daha sonra huni dikey olarak yukarı doğru çekilmiş ve betonun kendi ağırlığı altında yayılması beklenmiş, oluşan çökme değeri huni yardımıyla hassas bir şekilde ölçülmüştür. Betonun taze birim hacim ağırlığını belirlemek için birim hacim ağırlık kovası üç eşit tabakada doldurulmuş ve her tabaka 25 kez şişlenmiştir. Daha sonra yüzeyi düzeltilerek hassas terazide kap + sıkışık numune ağırlığı belirlenmiştir. Hazırlanan karışımlar, yağlanmış plastik numune kaplarına üç eşit tabaka halinde ve her tabaka 25 kez şişleme çubuğu ile şişlenerek yerleştirilmiştir. Numuneler kalıplarda 24 saat bekletildikten sonra çıkarılarak  $23 \pm 3$  derecedeki kirece doymuş su içeren kür havuzuna konulmuştur. Test gününe kadar (7, 28, 56 ve 90 gün boyunca) kür havuzunda bekletilen numuneler test öncesi kür havuzundan çıkarılarak suyunun süzülmesi beklenilmiştir. Daha sonra basınç testine tabi tutulmuşlardır. Numunelerin basınç dayanım testleri TS EN 12390-3 ve ASTM C39’ye göre yapılmıştır.

#### **4.2.6. Yüksek dayanımlı beton bakımı**

Çimento ile suyun karıştırılmasından sonra iki temel reaksiyon oluşmaktadır (Neville, 1994). Bu reaksiyonlar sonucunda meydana gelen kompleks yapının sertleşmesi ile beton

dayanım kazanmaktadır (Erdoğan, 2003). Bu reaksiyonların devam edip betonun dayanım kazanması için beton, belirli bir sıcaklık ve neme sahip ortamda bekletilmesi gerekmektedir (Neville, 1995., Erdoğan, 2003., Aitcin, 1998). Numuneler, alındıkları yerden taşınmadan, kalıp içerisinde (24 saatte olmak üzere) yeterli sertliğe ulaşmaya kadar, dış etkilerden, şoktan titreşimden ve kurumadan korunmuştur. Kalıptan çıkarılan numuneler Şekil 4.6’da gördüğü gibi kirece doygun  $22 \pm 3 \text{ C}^0$  derecedeki suda, deney gününe kadar bakıma tâbi tutulmuştur. 7, 28, 56 ve 90 gün sonunda numuneler kürden çıkarılarak basınç testine tâbi tutulmuşlardır.



**Şekil. 4.6.** Yüksek dayanım beton bakımı

#### **4.2.7. Taze betonun kıvamının belirlenmesi**

TS EN 12350-8’de belirtilen yöntem uygun olarak betonun kıvamı belirlenmiştir. Çökme testi Şekil 4.7’de gördüğü gibi, betonun yerleştikten sonra ne kadar çökmenin oluşacağını test edildiği bir deneydir.



**Şekil 4.7.** Çökme testi

#### 4.2.8. Kılcal su emme deneyi

Beton numunelerde kılcal su emme deneyi, TS EN 13057 (Anonim , 2004a) ile ASTM C 1585 (Anonymous , 2013) standardına göre gerçekleştirilmiştir. Deney numuneleri etüvde değişmez ağırlığa gelinceye kadar kurutulduktan sonra, ortam sıcaklığında soğutulup kuru tartımları alınmıştır. Numunelerin su ile temas eden yüzey alanının (F, cm<sup>2</sup>) boyutları kumpas yardımıyla ölçülmüştür. Daha sonra numuneler bir kap içinde su içerisine bırakılıp, her bir numunenin 1-4-9-16-25-36-49-64-81 dakikalardaki (t, dk) su emme miktarı, hassas terazide tartılarak kütle artışları şeklinde belirlenmiştir (Q, cm<sup>3</sup>). Bu deney esnasında alınan bir görüntü Şekil 4.8’de gösterilmiştir.



Şekil 4.8. Kılcal su emme deneyinden alınan bir görüntü

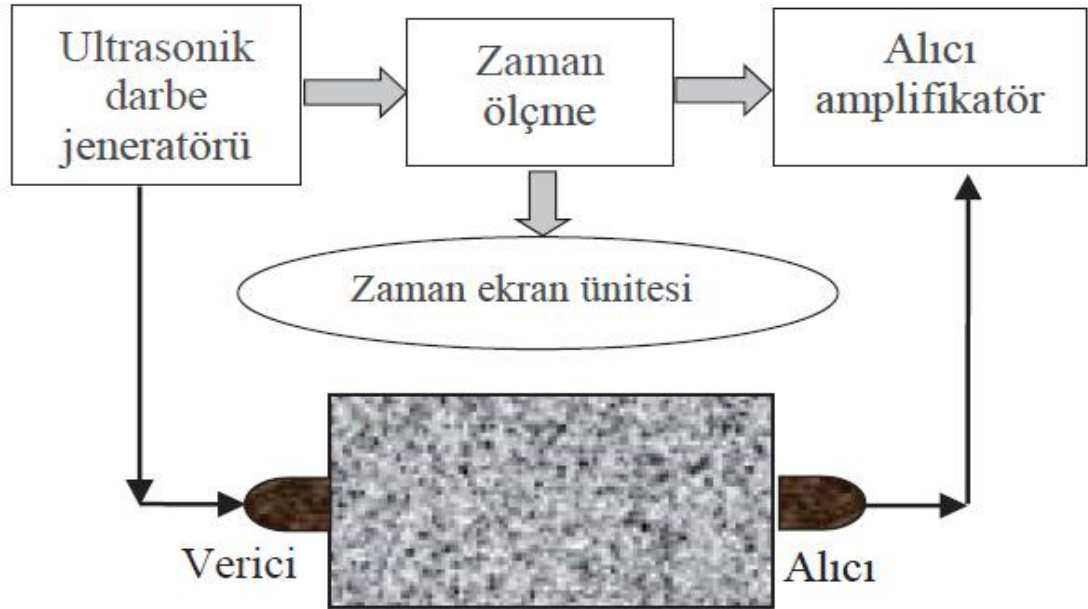
Elde edilen veriler ile her bir numunenin birim alanından emdiği su miktarı hesaplanmış, yatay ekseninde deney boyunca geçen sürelerin karekökü ( $\sqrt{t}$ ), dikey ekseninde ise birim alanda emilen su miktarı olacak şekilde bir eğri çizilmiştir. Bu eğrinin eğimi ile kılcal su emme katsayısı değerleri bulunmuştur. Eğimden hareketle bulunan bu değerler aşağıdaki formül ile de kontrol edilmiştir.

$$K = \frac{Q}{F \cdot \sqrt{t}} \quad (4.11)$$

Formülde; K ile kılcal su emme katsayısı, Q ile emilen su miktarı, F ile numunelerin su ile temas eden taban alanı ve t ile de numunelerin suya temas ettiği süre ifade edilmektedir. Kılcal su emme deneyi, 90 günlük küp numuneler üzerinde yapılmıştır.

#### 4.2.9. Ultrasonik geçiş hızı testi

Ultrasonik test metodu, betonun dayanımının belirlendiği tahribatsız deney yöntemlerinden biridir. Aynı zamanda bu yöntem; betonda hata ve kusur tespiti, içyapı incelenmesi, ASTM 1999a; RILEM 1972; BS 1997'ye göre, elastik modülü tahmini ve kalınlık ölçme gibi birçok parametrenin belirlenmesinde de kullanılır. Bu test yöntemi oldukça geniş bir uygulamaya sahiptir. Çok kalın olan numunelerin deneylerinde bile kullanılabilir olmasıyla ve çok küçük kusurların bile tespitinde yüksek doğruluk oranına sahip olması sebebiyle diğer tahribatsız test yöntemlerine göre daha çok tercih edilmektedir (Zebari vd., 2016). Kesme dalgaları ölçüm yapılan bütün numunelerde sabit hızla yol alırlar. Şekil 4,9'de görüldüğü gibi, bu hız bilindiği takdirde, gidiş dönüş zamanı yardımıyla dalganın kat ettiği yol hesaplanıp numune kalınlığı, genişliği ve uzunluğu tespit edilebilir. Betonun elastik özellikleri ultrasonik hızını etkilemekte ve beton içerisindeki ortama ait elastik özelliklerin değişimleri UGH yöntemiyle belirlenebilmektedir (Bogas vd., 2013). Betonun içerisinde bulunan kusurlar, çatlaklar ve donatılar ultrasonik dalgaları yolundan saptırır ve yansıyıp geri dönmesine neden olurlar. Gidiş-dönüş süresinden faydalanarak, kusurların ve hataların yerleri tespit edilip büyüklükleri tahmin edilebilmektedir (Zebari vd., 2016).



Şekil 4.9. Ultrasonik test görüntü şeması

Ölçüm alınacak yüzeyler tozdan arındırılarak jel ile temizlenmelidir. Bu çalışmada sensörler ile numune arasında boşluk kalmayacak şekilde tam teması sağlamak için saydam bir jel kullanılmıştır. UGH deneyinden bir görüntü Şekil 4.10'da verilmiştir. Ultrasonik geçiş hızı(km/sn), ultrasonik dalgasının aldığı yol (km), ultrasonik dalgasının geçiş zamanı ( $\mu$ s). Ultrasonik deneyi sonuçlarının değerlendirilmesinde mikro saniye ( $\mu$ s) olarak okunan ultrasonik geçiş süresi değerleri aşağıdaki formülde uygulanarak numune içinden geçen sesin hızı bulunmuştur.

$$V = L/T \quad (4.12)$$

V = geçiş hızı (km/sn)

L = numune boyutu (mm)

T = sesin geçiş süresi ( $\mu$ s)



Şekil 4.10. Ultrasonik test görünümü

## 5. ARAŞTIRMA BULGULARI

### 5.1. Taze Betonun Özellikleri

Taze betonun en önemli özelliklerinden birisi kıvamdır. Kıvam taze betonun işlenebilme ve segregasyon gibi durumlarını belirlemektedir. Şahin (2007) işlenebilirliği; taze betonun kolayca karıştırılabilmesi ve segregasyona uğramadan taşınabilmesi olarak tanımlamaktalar. Aitcin (2007), taze beton özelliklerinin optimizasyonunu, işlenebilme adı altında tek bir özellik olarak ifade etmektedir. Kılınç ve Akkaya (2007), betonda işlenebilmeyi taze betonun katılaşma göstermeden önceki durumuyla ilgili bir özellik olduğunu belirtmektedirler. Özellikle sıcak havalarda ve uzun taşınma sırasında, betonun katılaşma süresi büyük önem arz etmektedir (Kılınç ve Akkaya, 2007). Bartos (2013)'e göre çimento ve su arasındaki kimyasal reaksiyonların hızı (hidrotasyon hızı), priz süresinin kısalığını veya uzunluğunu etkileyen en önemli faktördür. Taze betonun sahip olması gereken işlenebilme özelliği, betonun kullanılacağı yapının tipi ile ve betonu taşımada ve yerleştirmede uygulanacak yöntemle doğrudan ilgili olan bir husustur. Neville'ye (1999), göre taze betonun işlenebilme özelliği üzerinde etkili olan parametreler; çimento miktarı, çimentonun özelliği, agrega gradasyonu, en büyük agrega tane boyutu, ince agreganın miktarı ve tane dağılımı oranı, sıcak hava koşulları ve beton karışımının sıcaklığıdır. Kılınç ve Akkaya (2007) betonun kıvamında en etkili parametrenin, beton üretiminde kullanılan kimyasal katkıları olduğunu belirtmektedirler. Kıvamı çok yüksek olan taze bir beton, düşük kıvamdaki bir betona göre daha rahat karıştırılabilmekte, pompalanabilmekte ve çoğu kez daha rahat yerleştirilebilmektedir (Kayali, 2008). Clayton vd. (2003) yaptıkları çalışmada yüksek dayanımlı betonların çökme değerlerinin 200 - 300 mm arasında değiştiğini belirtmektedirler. Aitcin (2007), yüksek dayanımlı betonlarda yeterli işlenebilirlik için çökme değerinin 180 mm'den daha büyük olması gerektiğini belirtmektedirler. Bu çalışmada elde edilen çökme değerleri 150-280 mm arasında değişmektedir. Üretilen betonlardan ölçülen çökme değerleri Tablo 5.3 'te görülmektedir. Bartos 'ye (2013), göre betonun kıvamının, betonun işlenebilme özelliğini tam olarak ifade etmeyeceğini söylemekle birlikte, yine de bunun betonun işlenebilirliğine dair önemli bilgi sağladığını söylemektedir. Beton karışımı içerisinde yer alan malzemelerin homojen bir tarzda dağılmış olması ve betonun yeterli kohezyona sahip olması istenir.

Beton teknolojisinde taze betonun içerisinde yer alan iri agrega ile çimento harcının herhangi bir nedenle ayrışma göstermesi olarak adlandırılmaktadır (Kayali, 2008).

### 5.1.1. Taze beton birim hacim ağırlığı

Çalışmada üretilen betonların taze birim hacim ağırlıkları ise 2,4 ile 2,45 gr/cm<sup>3</sup> arasında değişmiştir. Tablo 5.1’de görüldüğü gibi en yüksek birim hacim ağırlık uçucu kül katkılı ve en düşük çökme değerine sahip olan 3’ nolu karışımda, en düşük birim hacim ağırlık ise 2,4 gr/cm<sup>3</sup> ile 400 kg/m<sup>3</sup> çimento ve 0,4 s/b oranında elde edilmiştir. Birim hacim ağırlık değerleri üzerinde çimento miktarı, uçucu külün varlığı ve kıvamın etkili olduğu görülmüştür. Bulunan bu değerlerin (Kıvanç, 2006 ) ve ( Aitcin, 1998 ve Neville 1995), yapmış oldukları çalışmada bulmuş oldukları 2,40 ile 2,45 gr/cm<sup>3</sup> değerleriyle uyumlu olduğu görülmüştür.

**Tablo 5.1.** Taze beton birim hacim ağırlığı

KN0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Taze beton birim hacim ağırlığı (gr/cm <sup>3</sup> )	2,40	2,42	2,45	2,40	2,44	2,41	2,40	2,41	2,42	2,41	2,43	2,42	2,40	2,42

## 5.2. Sertleşmiş Betonun Bazı Fiziksel Özellikleri

### 5.2.1. Sertleşmiş betonun birim hacim ağırlığı

Bremner ve Holm (1995), yüksek dayanımlı betonun, birim hacim ağırlığının betonun kullanım amacına, betonda kullanılan agreganın birim ağırlığına ve beton karışımında kullanılan bağlayıcı miktarına bağlı olarak değiştiğini belirtmektedirler. Bu çalışmada elde edilen betonların (90 gün) birim hacim ağırlıkları 0,3, 0,35 ve 0,40 s/b oranlarında sırasıyla 2,45, 2,43, 2,40 gr/cm<sup>3</sup> olarak bulunmuştur. Birim hacim ağırlıkların karışım oranlarına göre değişimleri yukarıda Tablo 5.2’deki gibidir. Savaş vd. (2019)’nin belirttiklerine göre birim hacim ağırlığın çok düşük olmasının nedeni agrega içerisinde çok ve büyük boşluğun olmasıdır. Kıvanç vd. (2006), yaptıkları çalışmalarda ürettikleri betonun birim hacim ağırlıklarının 2,4 ile 2,49 gr/cm<sup>3</sup> arasında değiştiğini belirtmektedirler. Bu değerler bu çalışmada elde edilen değerlerle çok benzerdir. Bu

çalışmada elde edilen değerlerin s/b oranının artmasıyla azaldığı, azaldıkça arttığı gözlemlenmiştir.

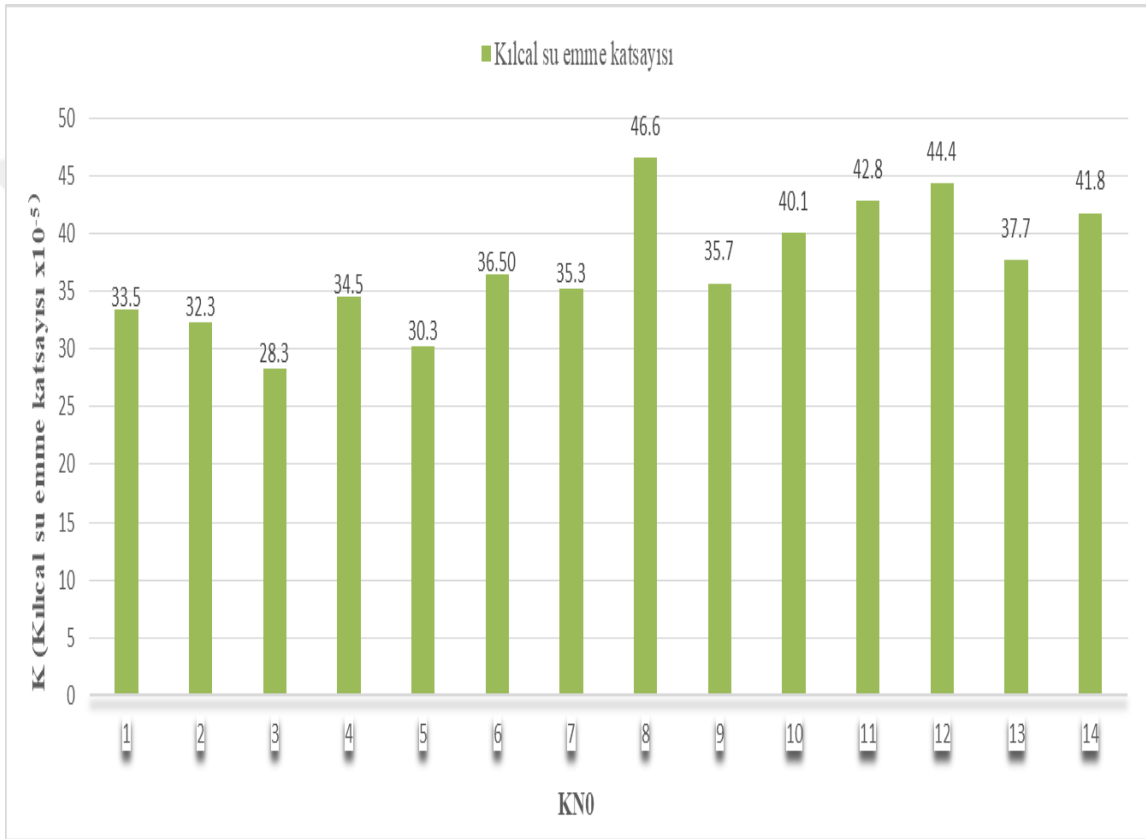
### 5.2.2. Sertleşmiş betonda su emme ve kılcal su emme sonuçları

Betonun su emme oranı üzerinde en etkili parametreler; agreganın boşluk yapısı ve miktarı, s/b oranı ve bağlayıcı miktarıdır (Aitcin,1998) , (Neville, 1999). Bu çalışmada 90 gün sonunda 48 adet numune üzerinde su emme deneyi yapılmış ve elde edilen sonuçların %1,49 ile %1,59 arasında değiştiği görülmüştür. Tablo 5.2’de görüldüğü gibi bu çalışmada elde edilen yüksek dayanımlı betonların su emme oranları s/b oranına, çimento miktarına ve süper akışkanlaştırıcı miktarına bağlı olarak değişmiştir.

**Tablo 5.2.** Elma köy kırmataş agregalı YDB da su ve kılcal su emme sonuçları

K: NO	S/B	Çimento miktarı (kg)		Uçucukül(%)	S.A (%)	Su emme(%)	Sertleşmiş beton birim hacim ağırlığı (gr/cm <sup>3</sup> )	K (kılcal su emme katsayısı 10 <sup>-5</sup> )
1	0,40	600	10	1,4	1,49	2,42	33,5×10 <sup>-5</sup>	
2	0,40	540	10	1,1	1,51	2,41	32,3×10 <sup>-5</sup>	
3	0,30	540	10	1,1	1,52	2,43	28,3×10 <sup>-5</sup>	
4	0,40	500	10	1,4	1,58	2,41	34,5×10 <sup>-5</sup>	
5	0,35	500	10	1,4	1,57	2,45	30,3×10 <sup>-5</sup>	
6	0,40	450	10	1,4	1,56	2,42	36,5×10 <sup>-5</sup>	
7	0,40	340	15	1,4	1,55	2,43	35,3×10 <sup>-5</sup>	
8	0,40	382,5	15	1,4	1,59	2,44	46,6×10 <sup>-5</sup>	
9	0,40	380	5	1,4	1,58	2,40	35,7×10 <sup>-5</sup>	
10	0,40	422,5	5	1,4	1,57	2,42	40,1×10 <sup>-5</sup>	
11	0,40	475	5	1,4	1,56	2,44	42,8×10 <sup>-5</sup>	
12	0,40	425	15	1,4	1,58	2,41	44,4×10 <sup>-5</sup>	
13	0,40	467,5	15	1,4	1,57	2,43	37,7×10 <sup>-5</sup>	
14	0,40	522,5	5	1,4	1,56	2,40	41,8×10 <sup>-5</sup>	

Aitcin (1998), betonun su emme oranının artmasının durabilitenin düşmesine neden olduğunu belirtmektedir. S/B oranının artmasıyla su emme oranı artmış ve azalmasıyla azalmıştır. Yüksek dayanım betonda yapılan kılcal su emme deneyi sonucunda ASTM C 1585 standardına göre 48 adet numune üzerinde yapılmıştır. Şekil 5.1’de görüldüğü gibi KN0:3 numunede su/bağlayıcı oranın 0,30 ondan dolayı kılcal su emme en düşük değerine 28.3 sahip olduğu bulunmuştur. En yüksek s/b oranı 0,4 olan KN0:8 nolu numunede ise en yüksek kılcal su emme değeri olan 46,6’ya ulaşılmıştır.



**Şekil 5.1** Kılcal su emme sonuçları

Halit Alperen Bulut (2021) ve Çorbacıoğlu (2008), yaptıkları çalışmalar sonucunda kılcal su emme değerini  $32 \times 10^{-5}$  ile  $46 \times 10^{-5}$  değerleri arasında bulmuşlardır. Bu değerler, bizim çalışmada bulmuş olduğumuz değerler ile uyumlu olduğu görülmektedir. S/b oranının artması ile kılcal su emme miktarı artmıştır. Karışımda uçucu külün kullanılması ve çimento miktarının artıp boşluk oranının azalması dolayısıyla kılcal su emme azalmıştır. Bu çalışmada elde edilen kılcal su emme değerlerinin yukarıda belirtilen diğer çalışmadaki değerlerle benzer olduğu görülmüştür.

### 5.3.Sertleşmiş Betonun Bazı Mekanik Özellikleri

#### 5.3.1.Basınç dayanımı

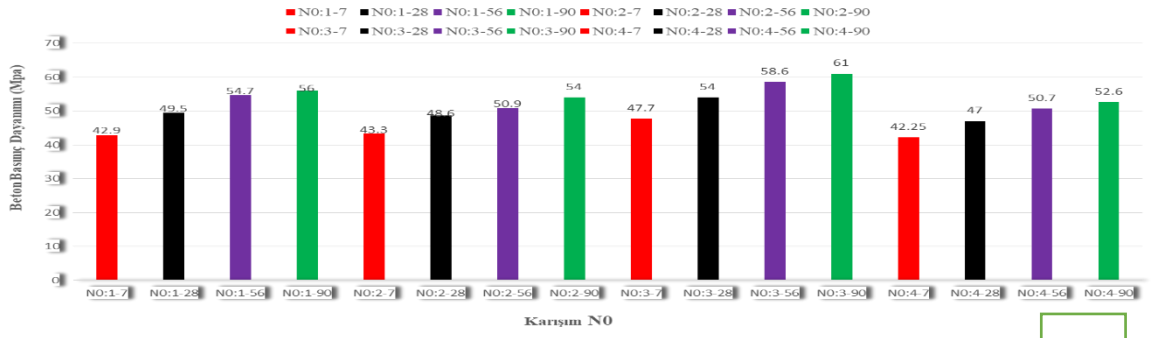
Elma köy agregası kullanarak yüksek dayanımlı beton üretebilmek için 3 farklı s/b ve beş farklı çimento miktarı kullanılarak karışımlar hazırlanmıştır. Farklı bağlayıcı miktarları ve s/b oranı kullanılarak numunelerin üretilmesinin nedeni, hangi bağlayıcı miktarında istenilen dayanımın elde edilebileceğini ve bağlayıcı miktarı ve s/b oranına bağlı olarak taze ve sertleşmiş betonun özelliklerindeki değişimleri belirlemektir. Numuneler üzerinde ASTM C 39, C 617 ve TS EN 12390-3 basınç dayanım testi yapılmış ve elde edilen sonuçlar Tablo 5.3'te verilmiştir. En yüksek basınç dayanım değeri olan 61 MPa 0,3 s/b oranında ulaşılmıştır. Sonuçlara göre s/b oranı azaldıkça dayanımın arttığı görülmektedir. AİTCİN (2007) yüksek dayanımlı betonlarda işlenebilirliği sağlamak şartıyla s/b oranının düşük tutulmasını önermektedir. Kumbhar vd., (2014) ve Murty vd., (2001), yaptıkları çalışmada YDB değerlerinin 42 ile 81 MPa arasında değiştiğini belirttiktedirler. Bu çalışmada elde edilen basınç dayanım değerleri 45-61 MPa arasında değişmektedir. Bu sonuçlara göre Erzincan Elma Köy kırma taş agregası kullanılarak üretilen betonları, yüksek dayanımlı beton olarak tanımlamak mümkündür. Erzincan Elma köyü kırma taş agregası kullanılarak farklı s/b, uçucu kül ve dozajda karışımlar yapılmıştır. Üretilen betonların basınç dayanımlarının 45 ile 61MPa arasında değiştiği görülmektedir. Bu çalışmada çimento ağırlığının farklı yüzdelerinde uçucu kül (%5, %10 ve %15) ikame edilmiştir. Uçucu kül, çimentonun bir kısmının yerine ikame edildiğinde, normal duruma göre dayanımda yaklaşık %10 oranında bir azalmaya neden olmuştur. Bunun nedeni; Tohumcu ve Bingöl(2013) belirttikleri gibi uçucu külün erken yaşlarda puzolanik etkisini ortaya koyamaması olabilir. Uçucu külün eklenmesi durumunda basınç dayanımlarında yaklaşık bir artış oluşmuştur. Bu artışın nedeni erken yaşlarda betonun kompozitesinin artması, ileri yaşlarda ise hem kompozite hem de puzolanik etkiden kaynaklanmış olabilir. Beton karışımlarında %5, %10 ve %15 oranında uçucu kül kullanılarak üretilen YDB'lerin 7 gün, 28 gün, 56 gün ve 90 günlük dayanımları gösterilmiştir. En yüksek dayanımı değerinin 61MPa, su/bağlayıcı oranı 0,3 gözlenmiştir. Uçucu kül erken yaşlarda puzolanik etkisini ortaya koymadığı için dayanımlarda bir miktar azalmalara sebep olmuştur. Ancak 90 günden sonraki yaşlarda basınç dayanım deneyleri yapılmadığı için

uçucu külün puzolanik etkisi ve dayanımlara geç yaşlarda ne oranda etkileyeceği tespit edilememiştir.

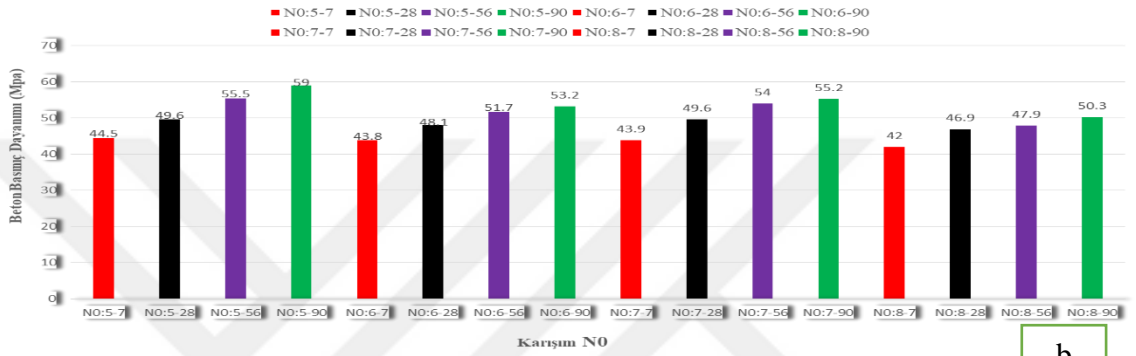
**Tablo 5.3.** Elde edilen betonların bazı mekanik özellikleri

Basınç dayanımı (MPa)						Bağlayıcı miktarı			
K:N0	S/B	7 gün	28 gün	56 gün	90 gün	Çimento (kg)	Uçucukül (kg)	S.A (%)	Çökme (mm)
1	0,40	42,9	49,5	54,7	56,0	600	60	1,4	280
2	0,40	43,4	48,6	50,9	54,0	540	60	1,1	230
3	0,30	47,7	54	58,9	61,0	540	60	1,1	150
4	0,40	42,25	47,0	50,7	52,6	500	50	1,4	220
5	0,35	44,5	49,6	55,5	59,0	500	50	1,4	190
6	0,40	43,8	48,1	51,7	53,2	450	50	1,4	250
7	0,40	43,9	49,6	54	55,2	340	60	1,4	260
8	0,40	42,0	46,9	47,9	50,3	382,5	67,5	1,4	170
9	0,40	43,4	48,5	51,3	53,6	380	20	1,4	190
10	0,40	42,8	45,4	50,2	54,8	422,5	22,5	1,4	200
11	0,40	42,9	45	49,7	51,0	475	25	1,4	240
12	0,40	42,9	48,1	51,9	54,2	425	75	1,4	240
13	0,40	42,7	45	47,15	50,4	467,5	82,5	1,4	250
14	0,40	43,1	49,2	50,9	53,1	522,5	27,5	1,4	260

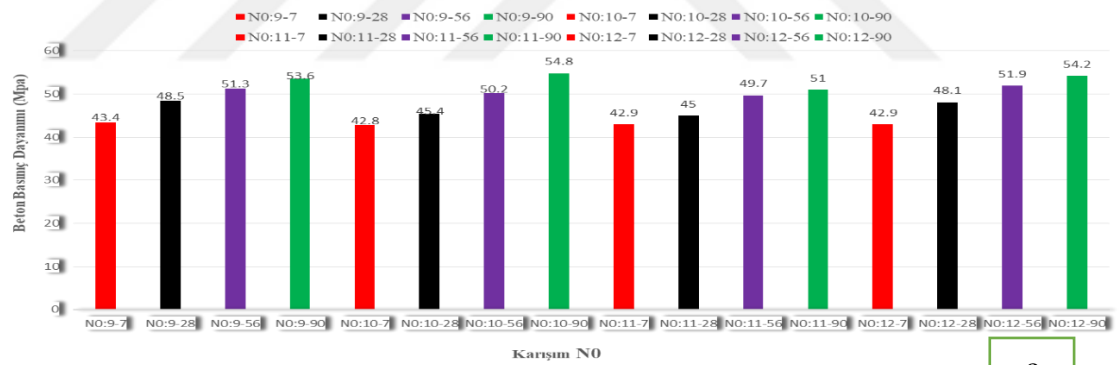
Şekil 5.2 (a, b, c, d)'de görüldüğü gibi ulaşılan en yüksek dayanımı değerinin 61MPa, su/bağlayıcı oranı 0,3 gözlenmiştir. Elde edilen sonuçlardan, çimento miktarının artmasıyla ve s/b oranının azalmasıyla basınç dayanımının arttığı görülmektedir. Sonuçların, He ve Wang'in (2007), yapmış olduğu çalışmadaki sonuçlarla benzer olduğu görülmüştür. Beton üretiminde kullanılan çimentonun erken dayanım kazanan portland çimentosu ve işlenebilirlik için kullanılan akışkanlaştırıcıların belirli dozaja kadar dayanım hızlandırıcı etkisinin olması şeklinde açıklamışlardır.



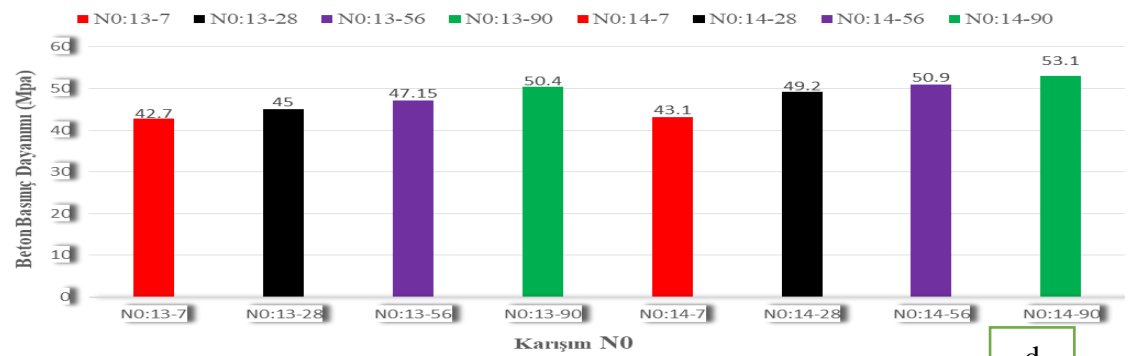
a



b



c



d

Şekil 5. 2. (a,b,c,d) Beton basınç dayanım sonuçları

Şekil 5.3' de görüldüğü gibi betonda kırılma; çimento matrisinin agregadan sıyrılması, matrisin dayanımını kaybetmesi ve agreganın kırılmasıyla oluşan 3 durumun birinden oluşur (Neville, 1995). Uçucu külün, çimentonun bir kısmının yerine ikame edilmesi durumunda normal duruma göre dayanımda % 10 oranında bir azalmaya neden olurken, eklenmesi durumunda % 10'luk bir artışa neden olmuştur. Bu çalışmada ulaşılan maksimum dayanım olan 61 MPa değerine ulaştığında, betondaki kırılmaya agreganın kırılmasıyla ulaşılmıştır. Bu çalışmada farklı miktarlarda çimento (400, 450, 500, 550 ve 600 kg/m<sup>3</sup>) kullanılmıştır.



**Şekil 5.3.** Betonun kırılma yüzey

Bu çalışmada süper akışkanlaştırıcı bağlayıcının ağırlıkça %1,1 ile %1,4 oranında kullanılmıştır. Wang vd. (2012), yüksek dayanımlı beton üretimlerinde akışkanlaştırıcı miktarını bağlayıcı ağırlığını %1- %1,8 oranında tavsiye etmektedir. Çalışmamızda kullanılan süper akışkanlaştırıcı miktarı, diğer çalışmada önerilen değerler ile paralellik göstermiştir. Aitcin de yüksek dayanımlı betonlarda işlenebilirliği sağlamak şartıyla s/b oranının düşük tutulmasını önermektedir. Diğer çalışmalarda olduğu gibi bizim çalışmamızda süper akışkanlaştırıcı miktarı arttıkça işlenebilirliğin arttığı gözlemlenmiştir.

### 5.3.2. Yüksek dayanımlı betonların ultrasonik değerleri

Numuneler 90 günün sonunda kür havuzundan çıkarılarak etüvde değişmez ağırlığa kadar kurutulmuştur. Soğuyan küp numuneler üzerinde ultrasonik testler yapılmış ve elde edilen sonuçlar Tablo 5,4’de verilmiştir. Ölçülen sonuçlarda, betondaki ses geçiş hızlarının 4,61 ile 5,41 Km/s arasında değiştiği gözlemlenmiştir.

**Tablo. 5.4.** Ultrasonik test deneyi sonuçları

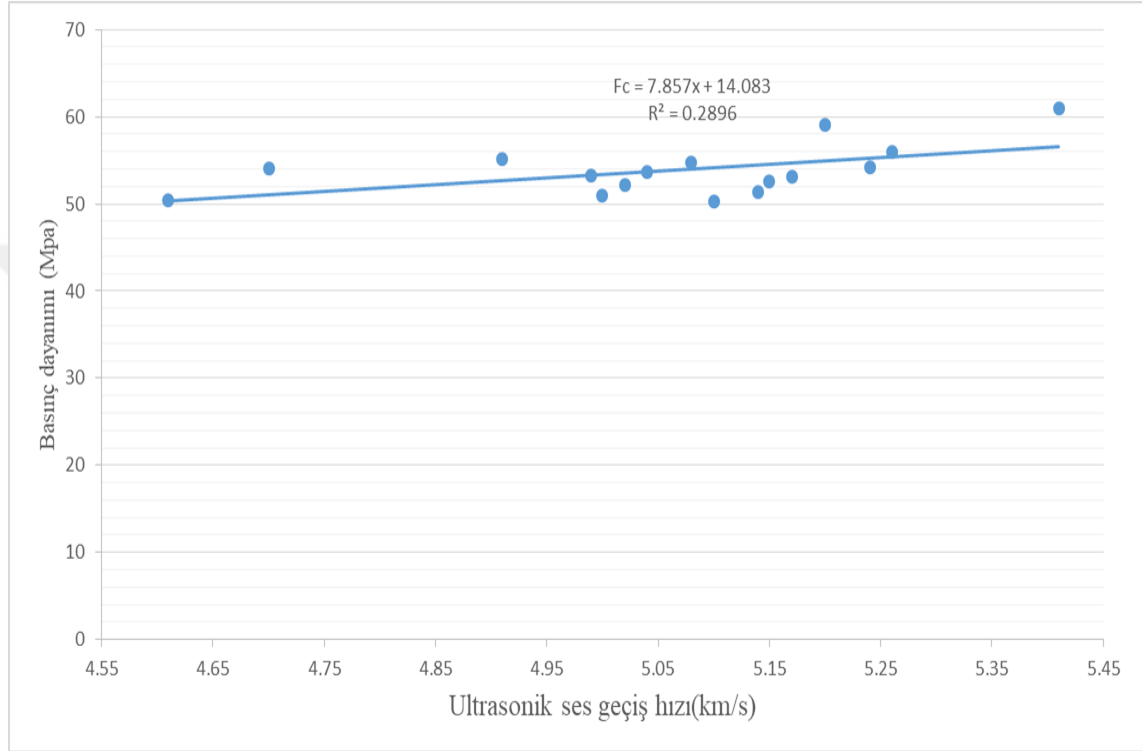
KN0	S/B	Çimento (kg )	Uçucu kül (kg )	S.A (%)	L(Numune boyutu mm)	T(Sesin geçiş süresi µs)	V (km/s)
1	0,40	600	60	1,4	150	31,6	5,26
2	0,40	600	60	1,1	150	31,9	4,70
3	0,30	600	60	1,1	150	30,9	5,41
4	0,40	400	40	1,4	150	29,1	5,15
5	0,35	450	45	1,4	150	30,2	5,2
6	0,40	500	50	1,4	150	31,5	4,99
7	0,40	550	55	1,4	150	31,7	4,91
8	0,40	360	40	1,4	150	30,4	5,1
9	0,40	405	45	1,4	150	27,7	5,04
10	0,40	450	50	1,4	150	28,6	5,24
11	0,40	495	55	1,4	150	28,5	5,26
12	0,40	425	75	1,4	150	28,5	5,08
13	0,40	450	50	1,4	150	30,4	4,61
14	0,40	475	25	1,4	150	29	5,17

Sonuçlara bakıldığında bağlayıcı miktarının artmasıyla ultrasonik geçiş hızının arttığı, azaldıkça azaldığı görülmektedir. Saad vd. (2005) ve Bogas vd. (2013), yapmış oldukları çalışmada s/b oranının sesin beton içerisindeki geçiş hızı üzerinde oldukça etkili olduğunu, bu oranın artmasıyla ultrasonik geçiş hızının düştüğünü, azaldıkça geçiş hızının arttığını belirtmekte; bunun nedenini s/b oranının artmasıyla beton içerisindeki boşluk oranının artması olarak açıklamaktadırlar. Bu çalışmada elde edilen sonuçlarında, aynı parametrelerden aynı şekilde etkilendiği görülmüştür.

Elde edilen sonuçlardan Şekil 5.4 de görüldüğü gibi beton basınç dayanımı ile geçiş hızı arasındaki bağıntı şeklinde yazılabilir.

$$f_c = 7.857 * t + 14.10 \quad (5.1)$$

Abo-Qudais, (2005), belirttiği gibi bu çalışmada elde edilen ultrasonik değerleri de s/b oranına bağlı olarak değişim göstermiştir.



**Şekil 5.4** .Ultrasonik geçiş hızı ile basınç dayanımı arasındaki ilişki

Betonun ultrasonik geçiş hızına göre sınıflandırılması Tablo 5.5'te verilmiştir. Bu değerler referans alındığında üretilen betonu “çok iyi” olarak nitelenebilir.

**Tablo 5.5.** Ultrasonik ses geçiş hızı (km/s) ve beton kalitesi arasındaki ilişki ( Zebari vd , 2016 )

< 3,0	Kötü
3,5	Orta
3,5-4,5	İyi
>4,5	Çok iyi

Bu çalışmada uçucu külün kullanılmasının betonun ultrasonik değerleri üzerinde olumlu etkisinin olduğu görülmüştür. Jain vd., (2013) , yapmış olduğu çalışmada Benzer etkiyi

gözlemlemiştir. (Jain vd ., 2013) ,yapmış oldukları çalışmada, uçucu külün katılmasının betonun diğer özelliklerinde olduğu gibi betonun ultrasonik ses geçiş hızı üzerinde de olumlu bir etki yaptığını belirtmekteler. Kencanawati (2018) , bu olumlu etkinin nedenlerini; uçucu külün, çimento tanesine göre oldukça küçük boyutta olmasından dolayı boşlukları doldurması ve çimentonun hidrasyon sonucu ortaya boşlukları daha düşük bir ortam oluşturması olarak tanımlamaktalar.



## 6. SONUÇ ve ÖNERİLER

Erzincan Elma köyden temin edilen agrega ile farklı s/b oranı, bağlayıcı miktarı ve katkı maddeleri kullanarak üretilen betonlar üzerinde yapılan test ve deneyler sonucu elde edilen bulgular özet olarak vermiştir.

- Ölçülen 150 ile 260 mm'lik çökme değerlerinin betonun işlenebilirliği için yeterli olduğu söylenebilir,
- Elma köy agregası kullanılarak yüksek dayanımlı beton üretmek mümkündür,
- Üretilen betonların küp basınç dayanımları 45 ile 61 MPa arasında değişmiştir,
- Bu agrega kullanılarak elde edilen 61 MPa basınç değerinden daha büyük değerlerdeki basınç dayanımına sahip beton üretimi mümkün değildir. Sebebi kırılmanın agreganın dayanımını kaybetmesiyle oluşmuş olmasıdır,
- Üretimde uçucu kül kullanılması betonun basınç dayanımı üzerinde küçük oranda da olsa bir artışa neden olmuştur,
- Ultrasonik ses geçiş hızları 4,61 ile 5,41 km/s arasında ölçülmüştür. Bu sonuçlar içyapıda boşluk ve çatlağın oluşmadığına ifade etmektedir,
- S/b oranı üretilen bütün betonların mekanik özellikleri üzerinde etkili olmuştur,
- Agrega tane boyutunun etkisini görebilmek için farklı Dmax değerlerinde (9 ile 12 mm) karışımlar hazırlanıp araştırma yapılabilir,
- Agreganın mekanik özelliklerini belirlemek için agrega ocağından agregayı temsil edecek kayaçlardan karotlar alınarak üzerlerinde basınç dayanım testi yapılmalı,
- Uçucu kül etkisini araştırmak için numuneler üzerinde basınç dayanım testleri uzun süre bekletilmiş (1 - 2 yıl ) numuneler üzerinde yapılabilir.

## KAYNAKLAR

- Abd Elrahman, M., & Hillemeier, B. (2014). "Combined effect of fine fly ash and packing density on the properties of high performance concrete: An experimental approach". *Construction and Building Materials*, 58, 225-233.
- Abo-Qudais, S. A. (2005). "Effect of concrete mixing parameters on propagation of ultrasonic waves". *Construction and building materials*, 19(4), 257-263.
- Aitcin, P. C. (2007). "Binders for durable and sustainable concrete. CRC Press".
- Aitcin, P. C. (1998). "High performance concrete. CRC press".
- Albarwary, I. H. M., Aldoski, Z. N. S., & Askar, L. K. (2017). "Effect of aggregate maximum size upon compressive strength of concrete". *Journal of Duhok University*, 790-797.
- Al-Amoudi, O. S. B., Abiola, T. O., & Maslehuddin, M. (2006). "Effect of superplasticizer on plastic shrinkage of plain and silica fume cement concretes". *Construction and Building materials*, 20(9), 642-647.
- Anandan, S., & Manoharan, S. V. (2015). "Strength Properties of Processed Fly Ash Concrete". *Journal of Engineering & Technological Sciences*, 47(3).
- Anıl, N. İ. Ş. (2019); "Mineral katkılı betonların kimyasal durabilitesinin toplam bağlayıcı miktarı ve eşdeğer su/çimento parametreleriyle beraber incelenmesi". *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 21(1), 459-473.
- Atiş, C. D. (2003). "High-volume fly ash concrete with high strength and low drying shrinkage". *Journal of materials in civil engineering*, 15(2), 153-156.
- Azeez, M. O., Ahmad, S., Al-Dulaijan, S. U., Maslehuddin, M., & Naqvi, A. A. (2019). "Radiation shielding performance of heavy-weight concrete mixtures". *Construction and Building Materials*, 224, 284-291.
- Bartos, P. (2013). "Fresh concrete: properties and tests (Vol. 38). Elsevier".
- Beshah, M. Y. (2019). "Experimental Investigation On Mechanical Properties Of High – Performance Concrete With Partial Replacement Of Cement By Fly Ash". *Doctoral dissertation, addis ababa science and technology university*.

- Barabanshikov, Y., & Akimov, S. (2020, October). "Effect of Metakaolin and MC Adhesive Additives on the Mechanical Properties of Concrete". *In International Conference Sustainable Energy Systems: innovative perspectives* (pp. 300-309). Springer, Cham.
- Bogas, J. A., Gomes, M. G., & Gomes, A. (2013). "Compressive strength evaluation of structural lightweight concrete by non-destructive ultrasonic pulse velocity method". *Ultrasonics*, 53(5), 962-972.
- Çam, A. (2019). "İnce agrega yerine kullanılan granüle yüksek fırın cürufunun beton özelliklerine etkisi". *Master's thesis, Bartın Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.*
- Camoses A, Aguiar B, and Jalali S (2003); "Durability of low cost high performance fly ash concrete". *International Ash Utilization Symposium, Centre for Applied Energy Research*, University of Kentucky.
- Camões, A., Aguiar, J. L., & Jalali, S. (2003). "Durability of low cost high performance fly ash concrete". *International Ash Utilization Symposium*. [S.l. : s.n.], 2003.
- Chindaprasirt, P., Homwuttiwong, S., & Sirivivatnanon, V. (2004). " Influence of fly ash fineness on strength, drying shrinkage and sulfate resistance of blended cement mortar". *Cement and Concrete Research*, 34(7), 1087-1092.
- Clayton, S., Grice, T. G., & Boger, D. V. (2003). " Analysis of the slump test for on-site yield stress measurement of mineral suspensions". *International journal of mineral processing*, 70(1-4), 3-21.
- Çorbacıoğlu, C. U. (2008). "Beton karışım tasarımının geçirimsizliğe ve mekanik özelliklere etkisi" *Doctoral dissertation, Fen Bilimleri Enstitüsü.*
- Deo, S. V. (2014). "A Review of High Volume Low Lime Fly Ash Concrete. In International Conference on Biological", *Civil and Environmental Engineering BCEE-2014.*
- Deo, S. V. (2016). "Problems review and suggestions for early high-strength, high-volume, low-lime fly ash concrete". *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 20(5), 611-624.

- Dhir, R. K., McCarthy, M. J., Zhou, S., & Tittle, P. A. J. (2004). "Role of cement content in specifications for concrete durability: cement type influences". *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings*, 157(2), 113-127.
- Dili, A. S., & Santhanam, M. (2004). " Investigations on reactive powder concrete: A developing ultra high-strength technology". *Indian concrete journal*, 78(4), 33-38.
- Ding, J. M., Wang, S. Z., & Liu, Y. (2012). "The Research of the Harmful Substances about Aggregate in Concrete". *In Advanced Materials Research (Vol. 391, pp. 354-358)*. Trans Tech Publications Ltd.
- Dunuweera, S. P., & Rajapakse, R. M. G. (2018). "Cement types, composition, uses and advantages of nanocement, environmental impact on cement production, and possible solutions". *Advances in Materials Science and Engineering*, 2018.
- Elimbi, A., Tchakoute, H. K., & Njopwouo, D. (2011). "Effects of calcination temperature of kaolinite clays on the properties of geopolymer cements". *Construction and Building Materials*, 25(6), 2805-2812.).
- Hoang, N. D., & Pham, A. D. (2016). "Estimating concrete workability based on slump test with least squares support vector regression". *Journal of Construction Engineering*, 2016.
- Haach, V. G., Vasconcelos, G., & Lourenço, P. B. (2011). "Influence of aggregates grading and water/cement ratio in workability and hardened properties of mortars". *Construction and Building Materials*, 25(6), 2980-2987.
- Habert, G. (2014). "Assessing the environmental impact of conventional and 'green' cement production". *In Eco-efficient Construction and Building Materials* (pp. 199-238). Woodhead Publishing.
- He, T., Shen, F., Wang, F., & Wang, H. (2007). " Influences of combination of superplasticizers and retarders on process of cement hydration". *Journal-Chinese Ceramic Society*, 35(6), 796.
- Iffat, S. (2015). "Relation between density and compressive strength of hardened concrete". *Concrete Research Letters*, 6(4), 182-189.

- Jones, M. R., & McCarthy, A. (2005). "Utilising unprocessed low-lime coal fly ash in foamed concrete". *Fuel*, 84(11), 1398-1409.
- Kayali, O. (2008). "Fly ash lightweight aggregates in high performance concrete". *Construction And Building Materials*, 22(12), 2393-2399.
- Kencanawati, N. N., Anshari, B., Paedullah, A. G., & Shigeishi, M. (2018). "The study of ultrasonic pulse velocity on plain and reinforced damaged concrete". *In MATEC Web of Conferences* (Vol. 195, p. 02026). EDP Sciences.
- Kılınç, C., & Akkaya, Y. (2007). "Katkı dozajı ve taze beton sıcaklığının kendiliğinden yerleşen beton özelliklerine etkisi". *İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye*.
- Kıvanç, H. (2006). "Süper Akışkanlaştırıcı Katkıların Sualtı Betonü Özelliklerine Etkisi" *Doctoral dissertation, Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Kumbhar, P. D., & Murnal, P. B. (2014). "A new mix design method for high performance concrete under tropical conditions". *Asian Journal of Civil Engineering (bhrc) VOL. 15, NO. 3 (2014) PAGES 467-483*.
- Limbachiya, M. C., Leelawat, T., & Dhir, R. K. (2000). "Use of recycled concrete aggregate in high- strength concrete". *Materials and structures*, 33(9), 574-580
- Longarini, N., Crespi, P. G., Zucca, M., Giordano, N., & Silvestro, G. (2014). "The use of fly ash in high strength concrete mix design". *In 18th Conference on Environmental and Mineral Processing (pp. 101-106)*.
- Malhotra, V. M. (2005). "Role of supplementary cementing materials and superplasticizers in reducing green house gas emissions to the environment". *In Proceedings of Second International Symposium on Concrete Technology for Sustained Development, Hyderabad, India (pp. 1-9)*.
- Matschei, T., Lothenbach, B., & Glasser, F. P. (2007). "The role of calcium carbonate in cement hydration". *Cement and concrete research*, 37(4), 551-558.
- Medeiros, M. H., & Helene, P. R. D. L. (2009). "Surface treatment of reinforced concrete in marine environment: Influence on chloride diffusion coefficient and capillary water absorption". *Construction and building materials*, 23(3), 1476-1484.

- Mehta, P. K. (2004, May). "High-performance, high-volume fly ash concrete for sustainable development". *In Proceedings of the international workshop on sustainable development and concrete technology (pp. 3-14)*. Ames, IA, USA: Iowa State University.
- Mulapeer, E. M. S. (2016). "Strength And Absorption Characteristics Of Fly Ash Based Geopolymer Composite Reinforced With Glass Fiber". *Master's thesis, Hasan Kalyoncu Üniversitesi*.
- Murty, C. V. R. (2001). "Shortcomings in structural design provisions of IS 456: 2000". *Indian Concrete Journal*, 2.
- Muthupriya, P., Subramanian, K., & Vishnuram, B. G. (2010). "Strength and durability characteristics of high performance concrete". *Int. J. Earth Sci. Eng*, 3, 416-433.
- Naik, T. R., Singh, S. S., & Hossain, M. M. (1994). "Permeability of concrete containing large amounts of fly ash". *Cement and concrete research*, 24(5), 913-922.
- Nath, P., & Sarker, P. (2011). "Effect of fly ash on the durability properties of high strength concrete". *Procedia Engineering*, 14, 1149-1156.
- Neville, A. M. (1995). "Properties of concrete (Vol. 4). London: Longman".
- Noorzyafiqi, D., Srisunarsih, E., Sucipto, T. L. A., & Siswanto, B. (2021, March). "Enhancing Slump Flow, Specific Gravity, and Compressive Strength Material Properties of Self Compacting Concrete (SCC) with Glass Waste Powder". *In Journal of Physics: Conference Series (Vol. 1808, No. 1, p. 012013)*. IOP Publishing.
- Osuji, S. O., & Ikogho, D. (2018). "Current Effects of Naphthalene Based Superplasticizer's Addition Process on Water Reduction and Grade C20/25 Concrete's Compressive Strength". *Journal of Civil Engineering Research*, 8(1), 9-14
- Pati11, S. L., Kale, J. N., Suman, S., & Bambhori, J. (2012). "Fly ash concrete": *a technical analysis for compressive strength*.
- Pofale, A. D., & Deo, S. V. (2011). "A Mix Design Procedure for Replacement of Sand with Fly Ash for Better Packing and for Saving Cement". *Journal of Structural EngineeringTarih: January 1, 2011*, 4(1).

- Russell, H. G., Graybeal, B. A., & Russell, H. G. (2013). "Ultra-high performance concrete: A state-of-the-art report for the bridge community (No. FHWA-HRT-13-060)". *United States. Federal Highway Administration. Office of Infrastructure Research and Development*.
- Saad A., Abo-Qudais., 2005. "Effect of Concrete Mixing Parameters on Propagation of Ultrasonic Waves. Science and Direct ".*Construction and Materials* (19), 257-263p.
- Safiuddin, M., & Zain, M. F. M. (2005). "Effects of silica fume and fly ash on the properties of high performance concrete". *In Proceedings of the annual conference on Canadian society for civil engineering.f*
- Şahin, R., Taşdemir, M. A., Gül, R., & Çelik, C. (2007). "Optimization Study and Damage Evaluation in Concrete Mixtures Exposed to Slow Freeze–Thaw Cycles". *Journal of materials in civil engineering*, 19(7), 609-615.
- Saini, P., & Ashish, D. K. (2015). "A review on recycled concrete aggregates". *SSRG International Journal of Civil Engineering*. SSRG-IJCE)–EFES April.
- Savaş, A. O. (2019). "Farklı Tür Agregalarla Üretilen Silindirle Sıkıştırılmış Betonların Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması", *Yüksek Lisans Tezi: Kırklareli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Shafieifar, M., Farzad, M., & Azizinamini, A. (2017). " Experimental and numerical study on mechanical properties of Ultra High Performance Concrete (UHPC). Construction and Building Materials", *Applied Surface Science* 156, 402-411.
- Sharma, M., Guria, C., Sarkar, A., & Pathak, A. K. (2012). "Recycle of waste fly ash: a rheological investigation".*International Journal of Science, Environment and Technology*, 1(4), 285-301.
- Srivastava, R., Kumar, Y., Kumar, R., Kumar, S., Gupta, S., Kumar, V., & Mahajan, V. "Investigation of High-Strength Concrete Using Fly Ash and Silica Fume". *Akgec International Journal Of Technology*, Vol. 10, No. 2
- Subaşı, s., beycioğlu, a., & emiroğlu, m. (2009). "Beton mekanik özelliklerinin taze beton özelliklerinden yararlanılarak yapay sinir ağları ile tahmini". *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 22(3), 147-155..

- Thomas, M. D. A. (2007). "Skokie, IL: Portland Cement Association". *Optimizing the use of fly ash in concrete* (Vol. 5420).
- Tohumcu, i., & Bingöl, a. f. (2013). "Silis dumanı ve uçucu kül katkılı kendiliğinden yerleşen betonların taze beton özellikleri ve basınç dayanımları". *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 15(43), 31-44.
- Türker, P., Erdoğan, B., Katnaş, F., & Yeğinobalı, A. (2009). "Türkiye'deki uçucu küllerin sınıflandırılması ve özellikleri, Ankara, Tçmb".
- Verma, A. S., & Mir, M. A. (2016). "Green Concrete Using Fly Ash and Silica Fume". *Recent Trends in Civil Engineering & Technology*, 6(2), 57-62.
- Wang, C., Yang, C., Liu, F., Wan, C., & Pu, X. (2012). "Preparation of ultra-high performance concrete with common technology and materials". *Cement and concrete composites*, 34(4), 538-544.
- Xiao, J., Xie, Q., & Xie, W. (2018). "Study on high-performance concrete at high temperatures in China (2004–2016)-An updated overview". *Fire safety journal*, 95, 11-24.
- Zebari, Z., Bedirhanoglu, İ., & AYDIN, E. (2016). "Beton basınç dayanımının ultrasonik ses dalgası yayılma hızı ile tahmin edilmesi". *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 8(1), 43-52.
- Zengin, B., & Cengiz, Ö. Z. E. L. (2019). "kendiliğinden yerleşen hematit agregalı betonun bazı fiziksel ve mekanik özelliklerinin araştırılması". *Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi*, 5(2), 95-102.
- Zhang, P., Wittmann, F. H., Vogel, M., Müller, H. S., & Zhao, T. (2017). "Influence of freeze-thaw cycles on capillary absorption and chloride penetration into concrete". *Cement and Concrete Research*, 100, 60-67.
- Ziółkowski, P., & Niedostatkiewicz, M. (2019). "Proceedings of the fib Symposium 2019: Concrete" - *Innovations in Materials, Design and Structures 2019*, 251-258.

## **EKLER**

### **Ek-1. Tez Çalışması Süresince Yapılan Akademik Çalışmalar**

Ispec 11th International Conference On Engineering & Natural Sciences Sep 18-19, 2021  
/ Siirt University muş-Turkey (the proceedings book)

Erzincan Elma Köy Kırmataş Agregası Kullanarak Yüksek Dayanımlı Beton  
Üretilebilirliğinin Arastırılması

WEB: <https://www.ispeccongress.org/fenmuhendislik>

