



**ARTVİN YUSUFELİ BÖLGESİNDEKİ PİRİNÇ  
KABUĞU KÜLÜNÜN BETONDA BAĞLAYICILIK  
ÖZELLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI**

**Harun Yüksel GÜLYAPRAK**

**Yüksek Lisans Tezi  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı  
Yapı Bilim Dalı  
Prof. Dr. Rüstem GÜL  
2019  
Her hakkı saklıdır**

**ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**ARTVİN YUSUFELİ BÖLGESİNDEKİ PİRİNÇ KABUĞU  
KÜLÜNÜN BETONDA BAĞLAYICILIK ÖZELLİĞİNİN  
ARAŞTIRILMASI**

**Harun Yüksel GÜLYAPRAK**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
Yapı Bilim Dalı**

**ERZURUM  
2019**

**Her hakkı saklıdır**



T.C.  
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



TEZ ONAY FORMU

ARTVİN YUSUFELİ BÖLGESİNDEKİ PİRİNÇ KABUĞU KÜLÜNÜN  
BETONDA BAĞLAYICILIK ÖZELLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

Prof. Dr. Rüstem GÜL danışmanlığında, Harun Yüksel GÜLYAPRAK tarafından hazırlanan bu çalışma 09/08/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı- Yapı Bilim Dalı' nda Yüksek Lisans tezi olarak ~~oybirliği/oy çokluğu~~ (3/3.) ile kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Rüstem GÜL

İmza

Üye : Prof. Dr. A. Cüneyt AYDIN

İmza

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Turkay KOTAN

İmza

Yukarıdaki sonuç;  
Enstitü Yönetim Kurulunun 23.08.2019 tarih ve 33./...67..... nolu kararı ile onaylanmıştır.

Prof. Dr. Mehmet KARAKAN Y.  
Enstitü Müdürü

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildirilerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### ARTVİN YUSUFELİ BÖLGESİNDEKİ PİRİNÇ KABUĞU KÜLÜNÜN BETONDA BAĞLAYICILIK ÖZELLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

Harun Yüksel GÜLYAPRAK

Atatürk Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı  
Yapı Bilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Rüstem GÜL

Yapılan bu tez çalışmasında pirinç kabuğu külü %0 (referans), %5, %10 ve %15 oranlarında çimento ile ikame edilerek su/çimento oranı 0,53 olan C25/30 sınıfı dört farklı beton üretimi yapılmıştır. Elde edilen taze betonların birim ağırlık ve işlenebilirlikleri ölçülerek, küp ve kiriş kalıplara dökülmüştür. 28 gün sonunda kiriş numuneler üzerinde eğilme dayanımı deneyi, 7, 28 ve 90. günlerde ise küp numuneler üzerinde birim ağırlık, ultrases geçiş hızı, su emme, schmidt çekici ve basınç dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiştir.

Elde edilen sonuçlara göre tüm beton örneklerinin hedef basınç dayanımını sağladığı görülmüştür. Dayanım ve durabilite özelliklerini geliştiren optimum pirinç kabuğu külü ikame oranının ise %5 olduğu tespit edilmiştir. Beton özelliklerini iyileştirmesi, çimentodan tasarruf sağlaması ve çevre kirliliğini azaltması bakımından yöresel pirinç kabuğu külünün beton imalatlarında kullanımının uygun olacağı kanısına varılmıştır.

**2019, 81 sayfa**

**Anahtar Kelimeler:** Pirinç kabuğu külü, çimento, beton

## **ABSTRACT**

M.S. Thesis

### **INVESTIGATION OF BINDING PROPERTIES IN CONCRETE OF RICE HUSK ASH IN ARTVIN YUSUFELI REGION**

Harun Yüksel GÜLYAPRAK

Atatürk University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Civil Engineering  
Structure Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Rüstem GÜL

In this study, rice husk ash is substituted with 0% (reference), 5%, 10%, 15% cement and four different types of C25/30 concrete were produced with water/cement ratio of 0,53. Unit weight and slump amount of fresh concrete was determined and concrete was poured into cube and prismatic molds. Flexural strength was performed on 28<sup>th</sup> day on prismatic samples. Unit weight, ultrasonic pulse velocity, water absorption, schmidt hammer and compressive strength tests were performed on cube samples on 7<sup>th</sup>, 28<sup>th</sup> and 90<sup>th</sup> days.

As a result, all concrete types provide target compressive strength in concrete class C25/30. It was found that the optimum rice husk ash substitution rate which improves the strength and durability properties was %5. It is concluded that regional rice husk ash will be suitable for use in concrete manufacturing. Because the use of regional rice husk ash improves concrete properties, saves cement and reduces environmental pollution.

**2019, 81 pages**

**Keywords:** Rice husk ash, cement, concrete

## **TEŞEKKÜR**

Yüksek Lisans tezi olarak sunduğum bu çalışma sırasında danışmanlığımı üstlenip tezimin her aşamasında değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren Sayın Prof. Dr. Rüstem GÜL hocama en içten teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım boyunca tecrübelerinden yararlandığım Artvin-Borçka Acarlar MYO Öğretim elemanlarından Sayın Dr. Öğr. Üyesi İlknur BEKEM KARA ve Sayın İnşaat Y. Müh. Cuma KARA'ya, tez çalışmasında deneyler konusunda bana yardım eden Sayın İnşaat Teknikeri Adem ŞAHİN'e ve manevi destekleriyle beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan değerli aileme teşekkürü bir borç bilirim.

**Harun Yüksel GÜLYAPRAK**

**Ağustos, 2019**

## İÇİNDEKİLER

|                                                               |          |
|---------------------------------------------------------------|----------|
| ÖZET.....                                                     | i        |
| ABSTRACT .....                                                | ii       |
| TEŞEKKÜR.....                                                 | iii      |
| SİMGELER DİZİNİ.....                                          | vii      |
| ŞEKİLLER DİZİNİ.....                                          | viii     |
| ÇİZELGELER DİZİNİ .....                                       | ix       |
| <b>1. GİRİŞ.....</b>                                          | <b>1</b> |
| <b>2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI .....</b>       | <b>7</b> |
| 2.1. Çimento .....                                            | 7        |
| 2.1.1. Çimentonun tanımı .....                                | 7        |
| 2.1.2. Çimentonun tarihçesi.....                              | 8        |
| 2.1.3. Çimento üretiminde kullanılan hammedeler .....         | 9        |
| 2.1.4. Çimento hidratasyonu.....                              | 10       |
| 2.1.5. Portland çimentosunun bileşimi .....                   | 14       |
| 2.2. Agregalar .....                                          | 15       |
| 2.2.1. Agregaya kaynakları .....                              | 16       |
| 2.2.2. Agregaların tane boyutu .....                          | 16       |
| 2.3. Beton Karma Suyu .....                                   | 17       |
| 2.4. Puzolanlar .....                                         | 18       |
| 2.4.1. Puzolanların tanımı.....                               | 18       |
| 2.4.2. Puzolanların sınıflandırılması.....                    | 19       |
| 2.4.3. Puzolanların aktivitesi .....                          | 21       |
| 2.4.4. Puzolanik reaksiyon ve reaksiyon ürünleri .....        | 22       |
| 2.4.5. Puzolanların beton özelliklerine etkileri.....         | 23       |
| 2.5. Pirinç Kabuğu Külü.....                                  | 26       |
| 2.5.1. Pirinç üretimi .....                                   | 26       |
| 2.5.2. Pirinç kabuğu.....                                     | 27       |
| 2.5.3. Pirinç kabuğu külü.....                                | 28       |
| 2.5.4. Pirinç kabuğu külü ile ilgili yapılan çalışmalar ..... | 28       |

|                                                         |           |
|---------------------------------------------------------|-----------|
| 2.6. Betonların Genel Özellikleri .....                 | 33        |
| 2.6.1. Basınç dayanımı .....                            | 33        |
| 2.6.2. Eğilme dayanımı.....                             | 34        |
| 2.6.3. Su emme .....                                    | 35        |
| 2.6.4. Yüzey sertliği .....                             | 35        |
| <b>3. MATERYAL ve YÖNTEM.....</b>                       | <b>38</b> |
| 3.1. Materyal.....                                      | 38        |
| 3.1.1. Portland çimentosu .....                         | 38        |
| 3.1.2. Agregası .....                                   | 39        |
| 3.1.3. Pirinç kabuğu külü.....                          | 40        |
| 3.1.4. Karışım ve kür suyu .....                        | 43        |
| 3.1.5. Kimyasal katkı.....                              | 43        |
| 3.1.6. Diğer malzemeler .....                           | 44        |
| 3.1.7. Deneylerde kullanılan aletler.....               | 44        |
| 3.1.6.a. Elekler ve çökme hunisi .....                  | 44        |
| 3.1.6.b. Betonyer .....                                 | 45        |
| 3.1.6.c. Kalıplar .....                                 | 45        |
| 3.1.6.d. Pres .....                                     | 46        |
| 3.1.6.e. Ultrases hızı ölçüm cihazı.....                | 47        |
| 3.1.6.g. Su kürü uygulamasında kullanılan su tankı..... | 48        |
| 3.2. Yöntem .....                                       | 48        |
| 3.2.1. Agregası deneylerinde uygulanan yöntemler.....   | 48        |
| 3.2.1.a. Agregaların tane büyüklüğü dağılımı .....      | 49        |
| 3.2.1.b. Agregası deneyleri .....                       | 49        |
| 3.2.2. Karışım seçeneklerinin belirlenmesi .....        | 49        |
| 3.2.3. Üretilen beton serilerinin kodlanması .....      | 50        |
| 3.2.4. Karışım hesabı.....                              | 51        |
| 3.2.5. Taze beton deneylerinde uygulanan yöntemler..... | 51        |
| 3.2.6. Sertleşmiş beton deneyleri.....                  | 53        |
| 3.2.6.a. Birim ağırlık deneyi.....                      | 54        |
| 3.2.6.b. Ultrases hızı deneyi .....                     | 54        |
| 3.2.6.c. Su emme deneyi.....                            | 55        |

|                                                             |           |
|-------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.2.6.d. Schmidt test çekici.....                           | 55        |
| 3.2.6.e. Eğilme dayanımı.....                               | 56        |
| 3.2.6.f. Basınç dayanımı .....                              | 57        |
| <b>4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA.....</b>              | <b>59</b> |
| 4.1. Taze Beton Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi .....  | 59        |
| 4.1.1. Birim ağırlık .....                                  | 59        |
| 4.1.2. İşlenebilirlik.....                                  | 60        |
| 4.2. Sertleşmiş Beton Deney Sonuçlarının Belirlenmesi ..... | 62        |
| 4.2.1. Birim ağırlık .....                                  | 62        |
| 4.2.2. Ultrases hızı deneyi .....                           | 63        |
| 4.2.3. Su emme deneyi .....                                 | 65        |
| 4.2.4. Schmidt deneyi .....                                 | 66        |
| 4.2.5. Eğilme dayanımı.....                                 | 68        |
| 4.2.6. Basınç dayanımı .....                                | 70        |
| <b>5. SONUÇ ve ÖNERİLER.....</b>                            | <b>73</b> |
| KAYNAKLAR .....                                             | 78        |
| ÖZGEÇMİŞ .....                                              | 83        |

## SİMGELER DİZİNİ

|                  |                                                              |
|------------------|--------------------------------------------------------------|
| B.H.A.           | Birim hacim ağırlık                                          |
| CEM I 42,5R      | Çimento sınıfı                                               |
| CO <sub>2</sub>  | Karbondioksit                                                |
| D <sub>max</sub> | Karışımda kullanılan maksimum agrega dane çapı               |
| K.K              | Kızdırma kaybı                                               |
| MÖ               | Milattan önce                                                |
| MPa              | Megapascal                                                   |
| PÇ               | Portland çimentosu                                           |
| PK               | Pirinç kabuğu                                                |
| PK0              | Pirinç kabuğu külü katılmamış örnekler                       |
| PK10             | Çimentonun %10'i oranında pirinç kabuğu külü içeren örnekler |
| PK15             | Çimentonun %15'i oranında pirinç kabuğu külü içeren örnekler |
| PK5              | Çimentonun %5'i oranında pirinç kabuğu külü içeren örnekler  |
| S/Ç              | Su/çimento                                                   |
| TÇMB             | Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği                        |

## ŞEKİLLER DİZİNİ

|                                                                                                               |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 2.1. Çimento bileşiklerinin zamana bağlı olarak basınç mukavemeti gelişimi .....                        | 11 |
| Şekil 2.2. Agrega en büyük tane boyutu 32 mm olan betonlar için belirlenen gradasyon eğrileri .....           | 17 |
| Şekil 2.3. Puzolanların sınıflandırılması .....                                                               | 20 |
| Şekil 3.1. Beton bileşiminde kullanılan agrega için granülometri eğrisi .....                                 | 39 |
| Şekil 3.2. Pirinç kabuğu yakma işlemi için kullanılan fırın .....                                             | 41 |
| Şekil 3.3. (a) Pirinç kabuğu (b) Isıl işlem görmüş pirinç kabuğu (c) Öğütülmüş ve elenmiş pirinç kabuğu ..... | 41 |
| Şekil 3.4. (a) Çökme hunisi (b) Elekler .....                                                                 | 45 |
| Şekil 3.5. (a) Betonyer (b) Kalıplar .....                                                                    | 46 |
| Şekil 3.6. Sertleşmiş beton deneylerinde kullanılan basınç ve eğilme presleri .....                           | 46 |
| Şekil 3.7. (a) Ultrases cihazı (b) Schmidt test çekici .....                                                  | 47 |
| Şekil 3.8. Kür tankı .....                                                                                    | 48 |
| Şekil 3.9. Küp ve kırış numuneler .....                                                                       | 50 |
| Şekil 3.10. Taze betonda çökme deneyi .....                                                                   | 52 |
| Şekil 3.11. Ultrases deneyi .....                                                                             | 54 |
| Şekil 3.12. Schmidt deneyi .....                                                                              | 56 |
| Şekil 3.13. Eğilme dayanımı deneyi .....                                                                      | 57 |
| Şekil 3.14. Basınç dayanımı deneyi .....                                                                      | 57 |
| Şekil 4.1. Taze betonun birim hacim ağırlığının beton türleri ile değişimi .....                              | 59 |
| Şekil 4.2. Taze betonun çökme değerinin beton türleri ile değişimi .....                                      | 61 |
| Şekil 4.3. Sertleşmiş beton birim hacim ağırlığının beton türleri ile değişimi .....                          | 62 |
| Şekil 4.4. Kül ikameli betonların ultrases geçiş hızı değişimleri .....                                       | 64 |
| Şekil 4.5. Kül ikameli betonların su emme değerleri değişimleri .....                                         | 65 |
| Şekil 4.6. Kül ikameli betonların schmidt değeri değişimleri .....                                            | 67 |
| Şekil 4.7. Kırış numunelerin beton türlerine göre 28 günlük eğilme dayanımı değişimleri .....                 | 69 |
| Şekil 4.8. Kül ikameli betonların basınç dayanımı değişimleri .....                                           | 71 |

## ÇİZELGELER DİZİNİ

|                                                                                         |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Çizelge 2.1. Çimento ana bileşenleri ve kısaltmaları.....                               | 12 |
| Çizelge 2.2. Tipik bir portland çimentosunun oksit analizi ve bileşen miktarları .....  | 15 |
| Çizelge 2.3. Çeltik üretim miktarları .....                                             | 26 |
| Çizelge 2.4. Türkiye'de çeltik üretimi.....                                             | 26 |
| Çizelge 2.5. Ultrasonik test yöntemiyle beton kalitesinin değerlendirilmesi .....       | 37 |
| Çizelge 3.1. Çimentonun kimyasal içeriği, fiziksel özellikleri ve basınç dayanımı ..... | 38 |
| Çizelge 3.2. Beton bileşiminde kullanılan agregalar için elek analizi sonuçları .....   | 39 |
| Çizelge 3.3. Beton karışımlarında kullanılan agregaların fiziksel özellikleri.....      | 40 |
| Çizelge 3.4. Pirinç kabuğu külüne ait kimyasal ve fiziksel özellikler .....             | 42 |
| Çizelge 3.5. Pirinç kabuğu külüne ait partikül boyutu.....                              | 43 |
| Çizelge 3.6. Beton karma ve kür suyuna ait analiz sonuçları .....                       | 43 |
| Çizelge 3.7. Kimyasal katkıya ait teknik özellikler .....                               | 44 |
| Çizelge 3.8. Beton karışım oranları .....                                               | 51 |
| Çizelge 4.1. Taze betonda birim ağırlık değerleri.....                                  | 60 |
| Çizelge 4.2. Taze betonda çökme miktarı değerleri .....                                 | 61 |
| Çizelge 4.3. Sertleşmiş betonda birim ağırlık değerleri.....                            | 63 |
| Çizelge 4.4. Beton türlerine göre ultrases geçiş hızı değerleri .....                   | 64 |
| Çizelge 4.5. Beton örneklerinin su emme değerleri.....                                  | 66 |
| Çizelge 4.6. Beton örneklerinin schmidt değerleri .....                                 | 67 |
| Çizelge 4.7. Kiriş numunelerin 28 günlük eğilme dayanım değerleri .....                 | 69 |
| Çizelge 4.8. Beton numunelerin basınç dayanımı değerleri .....                          | 71 |

## 1. GİRİŞ

Beton; bağlayıcı, agrega, su ve gereksinim olması halinde katkı maddelerinin oranlarını dikkatli bir şekilde belirleyerek biraraya getirilmesiyle oluşturulan karışımın, ihtiyaca cevap verecek şekil ve boyutlardaki kalıplara boşluksuz yerleştirmek ve uygun bakım koşulları altında sertleştirmek şeklinde elde edilen kompozit bir malzemedir. Amaçlanan sonuca varılması adına malzeme seçimi, malzeme miktarlarının belirlenmesi, karıştırma, taşıma, yerine yerleştirme, sıkıştırma ve beton bakım işlerinin hepsinin doğru yapılması gerekmektedir (Baradan vd 2012).

Beton, dünya çapında kullanılan ana yapı malzemesidir. Ana yapı malzemesi olmasının sebepleri arasında, gösterdiği etkileyici mekanik özellikler, ucuz olması ve gereksinimleri karşılayabilmesi gösterilebilir (Halef 2019). Günümüzde bir çok yapı çeşidinde kullanılan en önemli ve popüler yapı malzemesi olan betonun (Erdoğan 2007) yıllık üretim miktarı 10 milyar metreküp civarındadır (Thomas 2018).

Beton bağlayıcı, agrega, su ve gereksinim olması halinde katkı maddelerinin biraraya getirilmesi ile oluşturulur. Bu malzemelerden biri olan bağlayıcılar karışımında önemli bir yere sahiptir. Bağlayıcı olarak kullanılan çimento betonun en önemli bileşenidir (Thomas 2018). Çimento su ile birleşerek 'çimento hamuru' adı verilen bir hamur meydana getirir. Başlangıçta plastik kıvamda (şekil verilebilir) bulunan hamur, zamanla gerçekleşen reaksiyonlar ile birlikte sertleşerek dayanım kazanır. Sertleşen hamur, agrega tanelerinin yüzeylerini kaplar, agrega taneleri arasındaki boşlukları doldurur ve agrega tanelerini birarada tutar (Erdoğan 2007).

Artan beton gereksinimlerinden dolayı çimento üretiminde de son yıllarda hızlı bir artış gözlenmektedir. 2018 yılında, çimento üretimi yılda 4.1 milyar tonu aşmıştır (Koushkbaghi *et al.* 2019). Bu kadar yüksek değerlere ulaşan çimento üretimi; doğal kaynakları azaltmakta, üretim aşamasında yüksek enerji tüketmekte ve büyük miktarlarda sera gazı salmaktadır . Bir tonluk sıradan Portland çimentosu üretimi

yaklaşık bir ton karbondioksit saldığı için küresel karbondioksit emisyonlarının neredeyse %7'sini oluşturmaktadır (Thomas 2018). Ayrıca dünyadaki enerjinin %2'lik kısmı çimento üretimi sürecinde harcanmaktadır (Ghia 2014).

Çimento ve inşaat endüstrileriyle ilgili ciddi çevre kirliliği ve sağlık tehlikeleri nedeniyle konu üzerinde çalışmalar önem kazanmıştır. Çimento üretimi kaynaklı zararları azaltmak için alınabilecek önlemler ise, üretim sürecinde yakıt tüketimini azaltmak ve bağlayıcı özellik gösterebilecek malzemeleri (ek çimentolama malzemeleri) çimentonun bir kısmı yerine kullanmaktır. İmalat sırasında ya da beton karışımına doğrudan katılabilecek bu ilave malzemeler çimento kullanım miktarını azaltmaktadır (Christopher *et al.* 2017).

Her yıl dünya çapında kullanılan önemli beton miktarına rağmen, beton bileşenlerin sürdürülebilirliği ve sert çevre koşullarına maruz kalan beton yapıların dayanıklılığı ile ilgili uzun süredir devam eden sorunlar bulunmaktadır. Portland çimentosu üretimi ve betonun dayanıklılıkla ilgili bazı beton sorunlarının başlaması ayrıca sebep olunan çevresel zararlar, çimento ve beton endüstrisi üzerindeki alternatif bağlayıcıların aranması üzerindeki baskıyı artırmıştır. Bu alternatif bağlayıcılar, çimentonun tüketiminin azaltılması ve beton ömrünün arttırılması nedeniyle sadece daha ekonomik ve sürdürülebilir bir seçim değil, aynı zamanda depolama alanlarına atılması gereken endüstriyel atık yan ürünlerinin azaltılmasına ve tehlike oluşturabilecek bazı atıkların da stabilizasyonuna imkan tanımaktadırlar (Najimi and Ghafoori 2019). Kullanılacak bu ilave malzemeler hem çimentonun üretiminden kaynaklanan zararların azaltılmasını sağlamakta hem de betonun performansını artırıcı etki yaratmaktadırlar.

Çevresel tehditleri en aza indirmek ve muhtemel avantajlarını değerlendirmek adına çalışmacılar tarafından betona katılabilecek birçok ilave malzeme üzerine çeşitli çalışmalar yapılmaktadır. Uçucu kül, silis dumanı, yüksek fırın cürufu, mısır koçanı külü, pirinç kabuğu külü vb. gibi çeşitli tarımsal ve endüstriyel atıkların betonda kullanımını araştırmacılar tarafından incelenmektedir. Betona dahil edilen bu malzemeler hem beton özelliklerini iyileştirebilmekte hem de atıkların bertarafına imkan

sağlamaktadır (Olutoge 2019). Genelde çimento ile yer değiştirme şeklinde kullanılan bu malzemelerin birçoğu puzolanik özelliklidir. Yani kendi başlarına bağlayıcılık özelliği olmamasına karşın uygun koşullar oluştuğunda bağlayıcılık özelliği gösterebilen malzemelerdir.

Çimento su ile birleşince bir dizi çok karmaşık kimyasal reaksiyon oluşur. Çimentonun karma bileşenlerinin su ile ayrı ayrı kimyasal reaksiyona girdikleri varsayılır ve hidrasyon sonunda her ana bileşen tarafından değişik hidrasyon ürünleri oluşur. Kalsiyum silikatların ( $C_3S$ ) ve ( $C_2S$ ) hidrasyonu sonucunda kalsiyum-silikat-hidrat (C-S-H) ile serbest kireç ( $Ca(OH)_2$ ) oluşmaktadır. ( $Ca(OH)_2$ ) nin meydana gelmesi, betonların kimyasal dayanıklılığını ve ya betonun zararlı ortamlara karşı dayanıklılığının azalmasının başlıca nedenidir. Serbest kirecin varlığının diğer sakıncası ise bu maddenin mekanik dayanımının düşük olmasıdır. Bundan dolayı ( $Ca(OH)_2$ ) aynı zamanda çimentonun büyük bir mekanik dayanım kazanmasına engel olur (Baradan vd 2012).

Hidrasyon sonucunda oluşan ( $Ca(OH)_2$ ), kendi başlarına çok az veya hiç bağlayıcı özelliği olmayan puzolanların bağlayıcılık kazanmasını sağlar. Puzolanlar ince bir şekilde öğütüldüğünde nemli ortamlarda ve normal sıcaklıkta kireç ( $Ca(OH)_2$ ) ile kimyasal reaksiyona girer ve bağlayıcı özellik kazanırlar. Puzolanın tipinden bağımsız olarak kireç-puzolan reaksiyonunun sonucunda genel olarak portland çimentosunun hidrasyonu ile aynı türden olan ürünler ortaya çıkar. Puzolanın bu reaksiyonu ile serbest kireç miktarı azalırken, mekanik özelliklere katkı yapacak ürünlerde artış gözlenir.

Pirinç kabuğu dünyanın pek çok bölgesinde özellikle de pirinç tarımının yoğun olduğu bölgelerde bol miktarda bulunan tarımsal bazlı bir atık malzemedir (Christopher *et al.* 2017). Pirinç kabuğu, çeltik ağırlığının yaklaşık %20 ila 23'ünü oluşturan pirinç öğütme işleminin bir yan ürünüdür. Dünya genelinde yılda 150 Milyon tondan fazla pirinç kabuğu elde edildiği tahmin edilmektedir. Bununla birlikte, bu miktarın yaklaşık %83'ü,

su ve toprağı kirleten atık olarak atılır (Kang *et al.* 2019). Atıkların zararlarını en aza indirmek için konu üzerinde çalışmalar yoğunlaşmıştır.

Pirinç kabuğı külünün karışımlarında kullanımı betonun dayanım ve dayanıklılık özelliklerinde çeşitli iyileşmeler sağlamaktadır. Külün çimento ile yer değiştirilerek kullanması ile betonun en önemli ve en pahalı bileşeni olan çimentonunda kısmen azaltılması sağlanabilmektedir. Bu sayede hem maliyetler düşürülebilmekte hem de doğaya CO<sub>2</sub> salınımı azaltılabilmektedir. Ayrıca çevre kirliliğine neden olan pirinç kabukları bu sayede uygun şekilde değerlendirilmiş olmaktadır (Thomas 2018).

Pirinç kabuğı, yüksek silisli bileşime bağılı olarak doğal bozunumu sınırlı olan bir tarımsal atıktır. Atık malzeme olarak biriktirilmeye çalışılsa çok fazla alan kaplayabilir. Besin değerleri düşük olduğundan hayvanlar için yem olarak da kullanılamaz . Pirinç kabuğunun bertarafı için olası çözümlerden biri, onları pirinç kabuğı külüne dönüştürmek ve bunları beton karışımlarına dahil etmektir (Thomas 2018).

Pirinç kabuğı külü, pirinç kabuklarının yakılmasıyla elde edilen yüksek yüzey alanı ve içeriğinden dolayı yüksek oranda reaktif puzolan olarak kabul edilen bir malzemedir. %75 organik uçucu madde içeren pirinç kabukları, yanma sırasında ağırlığının yaklaşık %25'ini kül olarak üretirler (Olutoge 2019).

Pirinç kabuğı kül partiküllerinin silika içeriğı, silika partiküllerin yapısı, inceliğı, tutuşma kaybı ve partiküllerin yüzey alanı külün reaktivitesini etkileyen ana faktörlerdir (Khan *et al.* 2018). Pirinç kabuklarının yakma aşaması uygun yapıdaki küllerin oluşabilmesi için büyük önem arz eder. Çünkü pirinç kabuğı külünün yapısı yakma ortamlarından etkilenir. Başlangıçta, pirinç kabuğı yaklaşık %50 selüloz, %25–30 lignin ve %15-20 silika içerir. Kristal ve amorf silika formları farklı özelliklere sahiptir ve kullanım için doğru spesifikasyonlara sahip kül üretmek önemlidir. Çok kristal yapıya sahip silika formlu küller düşük reaktivite göstermektedirler. Kabuğun yanma sıcaklık aralığına ve yanma süresine bağılı olarak kristalin ve amorf silika formları elde edilir (Christopher *et al.* 2017). Pirinç kabuğunu 700°C'nin altında bir sıcaklıkta

yakmak, külün iç yapısında istenilen bir yapı olan amorf silika üretir. Bu kontrolsüz koşullarda, reaktivite elde etmek için külleri çok ince bir tanecik boyutuna öğütülmesi gerekebilir. Kontrollü yanma ile üretilen küller, yüksek konsantrasyonlu (ağırlıkça %85–95) amorf silika içeren gözenekli bir yapıya sahip olurlar. En yüksek amorf silika içeriğini elde etmek için en uygun yanma sıcaklığı 500–700°C'dir (Kang *et al.* 2019). Bununla birlikte, kontrollü koşullar altında, kristalimsi olmayan bir formu ve hücreli bir mikro yapıyı koruyan ve puzolanik reaksiyonları kolaylaştıran geniş bir yüzey alanına sahip olan bir silika üretmek daha kolaydır (Miller 2019).

Yanma koşullarının dışında kabukların kimyasal yapısı da küllerin özelliklerini farklılaştırır. Pirinç kabuğu külünün kimyasal bileşimi büyük ölçüde pirinç kabuğunun kaynağına ve bunların organik bileşimine bağlıdır. Farklı kaynakların kimyasal bileşimi, bölgenin doğal iklim ve coğrafi durumuna bağlı olarak farklılık göstermektedir (Khan *et al.* 2018). Pirinç ekimi sırasında, bitkiler silikayı topraktan alırlar ve yüksek silika toprağı yüksek silika içerikli kül ile sonuçlanır. Coğrafi ve iklim koşulları, pirincin üretimini ve mineral içeriğini ve bunların küllerini etkileyebilir. Ayrıca, gübre seçimi, küllerin yanmadaki kimyasal bileşimini değiştirebilir ve bu da betondaki faydalarını etkileyebilir (Miller *et al.* 2019).

Pirinç kabuğu külünün betonda kullanımı ile alakalı literatürde bir çok çalışma bulmak mümkündür. Bu çalışmalar incelendiğinde pirinç kabuğu küllerinin beton özelliklerine genelde olumlu yönde katkı yaptığı görülmektedir. Yapılan çalışmaların, ekonomik koşullarda istenilen özelliklerde kül üretebilmek ve bu küllerin betona hangi oranlarda katılabileceği üzerine yoğunlaştığı söylenebilir. Yapılan onca çalışmaya rağmen değişen parametrelerden dolayı referans kabul edilebilecek sonuçlar görmek zordur. Kabukların küle dönüştürülüp betona katılması sürecindeki uygulanan işlemler ve de kabukların elde edildiği bölge farklılıkları, yapılan çalışmalarda farklı sonuçlar bulunmasına sebep olmaktadır.

Ülkemizde Artvin ili baraj yapılarının yoğun olduğu bir ildir. Baraj inşaatlarında kullanılan betonların da bazı özelliklere (düşük hidrasyon ısısı, düşük su geçirgenliği

vb.) sahip olması beklenir. Beton sağladığı avantajlarından dolayı (Ziari *et al.* 2017) yol kaplama malzemesi olarak da kullanılmaktadır. Bölgede olumsuz arazi şartlarından dolayı köy yollarının kaplamasında genelde beton tercih edilmektedir. Artvin ilinde köy yolları ile beraber kentiçi yol kaplamalarında da beton imalatları yapılmaya başlanmıştır (Anonim 2018a).

Bu çalışma kapsamında Artvin Yusufeli bölgesinden toplanan pirinç kabuklarından elde edilen küller betonda çimento yer değiştirme malzemesi olarak kullanılmıştır. Pirinç kabuğu külünün bölgesel farklılığının beton özelliklerine etkisi araştırılmış, baraj ve yol kaplama betonlarında kullanılabilirliği irdelenmiştir.

## 2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI

### 2.1. Çimento

#### 2.1.1. Çimentonun tanımı

Çimento, ana hammaddeleri kalkerle kil olan, su ile ıslatıldığında oluşan reaksiyon ile sertleşen ve bir daha yumuşamayan hidrolik bir bağlayıcıdır (Güner 2012).

Çimento sözcüğü, latince “Caementum” sözcüğünden türetilmiştir ve yontulmuş taş anlamına gelmektedir. Hidrolik bağlayıcı malzeme olan çimento inşaat malzemeleri içerisinde önemli bir yer tutar. Çimentoya özelliklerini kazandıran iki önemli unsurdan biri hammadde bileşimi, diğeri ise klinkerin ısısal işlemleridir. Klinker bileşimi, esasen hammadde içeriğiyle doğrudan ilintilidir. Ayrıca kullanılan yakıt cinsi ve yakıt içerisinde maddeler de klinker bileşimini etkileyen faktörlerdendir (Dayı 2006).

Çimento üretimi karmaşık bir işlemdir ve büyük üretim alanlarına gereksinim duyulmaktadır. Çimento üretiminde hedef, karışıma girecek malzemeleri uygun oranlarda karıştırmak ve yüksek sıcaklıkta (1400-1650°C) işlemektir. Yüksek sıcaklıkta yakılan maddeler üzerinde bir takım değişiklikler oluşur ve çimentoya bağlayıcılık kazandıracak olan yapılar meydana gelir (Mamlouk and Zaniewski 2006).

Çimentoda kireç taşı ve kil temel ham maddelerdir. Saf olmayan alüminyum, kalsiyum ve demir silikatlar kili oluşturan bileşenlerdir. Bu maddeler belirli oranlarda karıştırılarak pişirilir. Yüksek sıcaklıkta temel maddeler değişikliğe uğrar. Pişirme işlemi sonrası kireç taşından CaO, kilden ise SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ortaya çıkar. Bu maddeler yine yüksek sıcaklıklarda biraraya gelerek çimentoya bağlayıcılık özelliği kazandıracak olan silikat ve alüminatları meydana getirirler. Çimento üretiminde hammadde olarak, klinkere %3 – 6 oranında alçı taşı (CaSO<sub>4</sub>.2H<sub>2</sub>O) katılır. Klinker ve alçı taşı birlikte öğütme işlemine tabi tutulur. Alçı taşı çimentonun priz süresini makul

düzeye getirmek için katılır. Klinkere öğütme sırasında katkı maddesi olarak %2 - 3 gibi az bir oranda, kireç taşı da katılmaktadır. Kireç taşı klinkere oranla daha kolay öğütülebilen bir malzemedir. Böylece kireç taşı taneleri klinker taneleri arasındaki boşlukları doldurur. Böylelikle çimentonun mukavemetini ve işlenebilirliği artırır. Çimentonun kolay yayılmasını sağlar.

### 2.1.2. Çimentonun tarihçesi

Uygarlığın başlangıcından beri insanoglu tas parçalarını yapıştırıp birleştirecek bir malzeme bulmaya çalıştı. Daha o zamanlarda böyle bir uygulamanın inaatlara esneklik ve çok yönlülük kazandıracığı anlaşılmıştı. En eski bağlayıcı malzemelerden biri olan "çamur" bugün bile dünyanın çeşitli yerlerinde saman vb malzemelerle karıştırılıp duvar elemanlarının üretilmesinde ve bağlayıcılık özellik kazanılmasın faydalanılmaktadır (Dayı 2006).

Çimento malzemesinin kullanımı MÖ 2000'li yıllara kadar uzanmaktadır. Eski Mısırlılar'ın killi jipsten yakma yoluyla elde ettikleri bir çeşit çimento benzeri malzemeyi kullandıkları, Anadolu'daki Hattuşuş ve Boğazkale gibi antik Hitit kentlerinde de kireç ile doğal puzzolanik özellik gösteren toprakların karıştırılarak harç yapılarak kullanıldığı bilinmektedir. Avrupa'da ise ilk kez İtalya'da, Büyük Roma İmparatorluğu döneminde (MÖ 12-14 yy.) çimento kullanıldığı bilinmektedir. 1756 yılında John Smeaton, İngiltere'de bir deniz fenerinin yeniden yapımında yumuşak kalker ve kilden üretilen bir çimento kullanmıştır. İlk olarak 1824 yılında İngiltere'de üretilen çimento bu tür yapı malzemeleri arasında en önemli yeri tutmaktadır. Amerika'daki ilk portland çimentosu üretimi ise 1871 yılında David O.Saylor tarafından gerçekleştirilmiştir (Anonim 1996).

Birkaç öncü çalışmanın ardından, Leeds sehrinde bir yapı ustası olan Aspdin 1824 yılında Portland çimentosunun patentini aldı. Sonraları hidrolik çimento kullanımı Avrupa ve Kuzey Amerika'da hızla yayıldı. Çimento üretiminde kullanılan ekipmanın geliştirilmesine başlandı.

Döner fırınların geliştirilmesine İngiltere'de 1877 yıllarında baslandı ve ilk başarılı uygulamacı olduğu kabul edilen Fredrick Ransome 1885 yılında döner fırını için patent aldı. Bu durum zamanın şartlarında çimento endüstrisi adına önemli bir gelişme olmasına karşın, fırın teknolojisinin gelişme göstermesi gerekiyordu. Ransome'ın fırınlarından sonra bazı Amerika'lı mühendisler bu bulusu geliştirmeye devam ettiler. Amerika'da ekonomik olarak çalışan döner fırın Atlas Çimento Şirketi'nden Hurry ve Seaman tarafından geliştirilerek 1895 yılında üretime başladı. Portland çimentosunun üretimi arttıkça hammadde ve çimentolarla ilgili deney yöntemleri ve karakterizasyonlar üzerine çalışmalar başladı. Çok sayıda laboratuvar çalışmasından sonra 1900'lerin başlarında başlıca çimento deneyleri büyük ölçüde standartlaşmış oldu. O zamandan beri bunların bir bölümü gözden geçirilip değiştirildi ve bütün dünyada çimento standartlarıyla yeni deneyler eklendi (Dayı 2006).

Türkiye'de ilk çimento fabrikası 20.000 ton/yıl kapasite ile 1911 yılında İstanbul-Darica'da kurulmuştur. Daha sonra bu fabrika 1923 yılında genişletilerek kapasitesi 40.000 ton/yıl'a yükseltilmiştir. 1950'li yıllara kadar Ankara, Zeytinburnu (İstanbul), Kartal (İstanbul) ve Sivas'ta 4 yeni çimento fabrikası kurulmuş ve toplam kapasite 370.000 ton/yıl'a yükselmiştir (Anonim 1996). TÇMB verilerine göre 2018 yılı itibariyle yıllık çimento üretim kapasitesi 140 Milyon Tonu geçmiştir. 2018 yılı için çimento üretimi ise 70 Milyon tonun üzerindedir (Anonim 2018b).

### **2.1.3. Çimento üretiminde kullanılan hammadeler**

Çimento klinkerinin eldesi için gerekli başlıca bileşenler kalsiyum oksit ve silisyum oksittir. Bunların yanında az da olsa alüminyum oksit ve demir oksite de ihtiyaç duyulur. Bu oksitleri içeren mineraller kireç taşı (kalker) ve kildir. Kireç taşından  $\text{CaO}$ , kilden  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  meydana gelir. Bu maddeler yine yüksek sıcaklıkta aralarında birleşerek çimentoya bağlayıcılık özelliği kazandıran silikat ve alüminatları meydana getirirler. Çimento bileşimine giren hammaddeler kalker, kil, marn ve alçıtaşıdır.

Kalker bileşiminde yüksek miktarda kalsiyum karbonat içeren bir kayaç türüdür. Genelde doğada saf halde bulunmazlar. Bileşimlerinde magnezyum karbonat, kil mineralleri, demir silikat-oksit ve silis gibi bileşikler içerir. Bu bileşikler üretilen çimentonun kalitesini olumsuz yönde etkileyebilmektedir.

Kil çimentonun ikinci derece önemli hammaddesidir. Kimyasal bileşimlerinde alüminyum oksit bulunur ve alüminyum silikat hidratlardan meydana gelirler. Çimento hammaddesi olarak kullanılacak kilin kimyasal ve mineralojik analizinin yapılması gerekir. Kimyasal analiz sonucunda  $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $CaO$ ,  $MgO$ ,  $K_2O$ ,  $Na_2O$ ,  $SO_3$  ve kızdırma kaybı yüzdeleri; mineralojik analizde de safsızlık oluşturan unsurlar ve bunların yüzdeleri saptanır.

Marn yeryüzünde yaygın olarak bulunan %50-70 oranında kalker ile %30-50 oranında kil karışımından oluşmuş kayaçlardır. Doğada düzgün tabakalar halinde bulunurlar. İçerisindeki kalker ve kil oranlarına göre özellikleri değişkenlik gösterir.

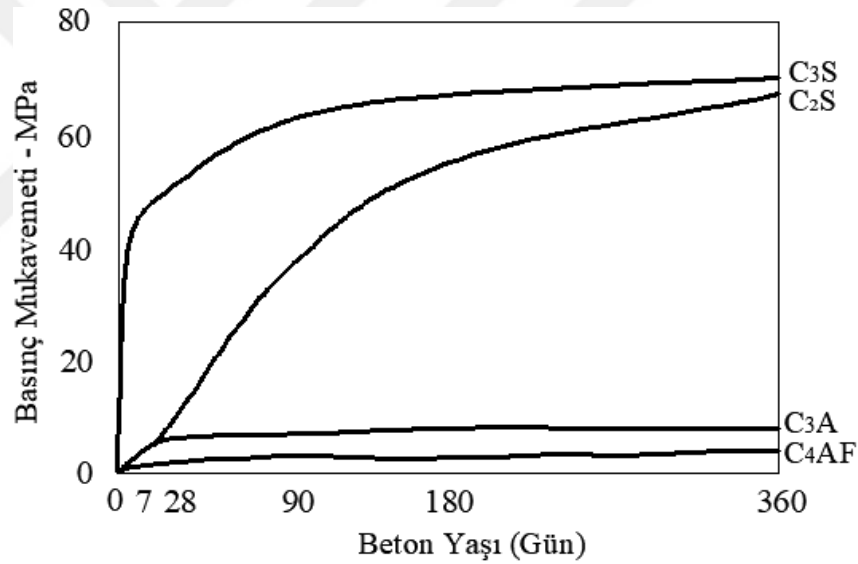
Alçı taşı doğada saf halde bulunmayan kararsız bir mineraldir. Çimento üretiminde priz süresini geciktirmesi için klinkere %3-5 oranında karıştırılarak kullanılır. Alçı taşı bünyesinde serbest silis, tuz, alkaliler ve bentonit içeren killer bulunmaması gerekir (Yalçın ve Gürü 2006).

#### **2.1.4. Çimento hidratasyonu**

Çimento ve su birleştiği anda, her anabileşen su ile ayrı ayrı reaksiyona girmekte ve hidratasyon (çimentoyu oluşturan maddelerin su ile yaptığı kimyasal reaksiyon) sonunda her anabileşen tarafından değişik hidratasyon ürünleri oluşmaktadır. Bu reaksiyonların etkisiyle çimento hamuru katılaşmakta (priz almakta) ve sertleşmektedir (dayanım kazanmaktadır). Çimento hamurunun özellikleri, kimyasal reaksiyonlar sonucunda ortaya çıkan değişik özelliklerdeki hidratasyon ürünlerinin çimento hamurunun içerisinde yer almış oldukları oranla belirlenmektedir (Erdoğan 2007).

Kalsiyum silikatlar çimentonun esas iskeletini oluşturur. Hidratasyon sonunda ( $C_3S$ ) ve ( $C_2S$ )'in hidratasyonu tamamlanınca %61'i C-S-H jeli, %39'u ise ( $Ca(OH)_2$ ) haline gelmektedir. ( $C_2S$ ) de ( $C_3S$ )'e benzer ürünler oluşturmakta yalnız ( $C_2S$ ) reaksiyonun sonunda %82'si C-S-H jeli %18'i ( $Ca(OH)_2$ ) haline gelmektedir (Mamlouk and Zaniewski 2006).

( $C_3S$ ) ve ( $C_2S$ ) bileşenlerinin hidratasyonu sonucunda ortaya çıkan C-S-H jel miktarı çimento hamurunun dayanımını belirler. Bu jeller bir anda oluşmayıp zamanla artan bir seyir izlemektedir (Erdoğan 2007). Ana bileşenlerin dayanıma katkılarının zamanla değişimi Şekil 2.1'de görülmektedir (Zhang 1994).



**Şekil 2.1.** Çimento bileşiklerinin zamana bağlı olarak basınç mukavemeti gelişimi (Zhang 1994)

Çimentoya bağlayıcılık özelliği kazandıran C-S-H moleküler büyüklükte olup, çimento taneciklerinden yaklaşık 1000 kat daha küçüktür. C-S-H'nin oluşması ile bu parçacıkların arasındaki Van der Waals kuvvetleri bağlayıcı özellik yaratmaktadır. C-S-H jelleri zayıf kristalli kolloidal parçacıklardan oluşur. Lif şekilli bu kristallerin dağılımında bir düzen yoktur ve dikenli bir keseye benzer görünümeleri vardır. Çimentodaki karmaşık bileşimlerin su ile yaptıkları kimyasal reaksiyon kısa zamanda biten bir reaksiyon

değildir. Bu reaksiyonlar senelerce sürmektedir. Neville (1986)'ın gösterdiği çimento ana bileşenleri Çizelge 2.1'de verilmiştir.

**Çizelge 2.1.** Çimento ana bileşenleri ve kısaltmaları (Neville 1986)

|                             | Oksit Bileşimi                                            | Kısaltma              |
|-----------------------------|-----------------------------------------------------------|-----------------------|
| Trikalsiyum Silikat         | $3\text{CaO}.\text{SiO}_2$                                | $\text{C}_3\text{S}$  |
| Dikalsiyum Silikat          | $2\text{CaO}.\text{SiO}_2$                                | $\text{C}_2\text{S}$  |
| Trikalsiyum Alüminat        | $3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$                       | $\text{C}_3\text{A}$  |
| Tetrakalsiyum Alüminoferrit | $4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$ | $\text{C}_4\text{AF}$ |

Çimento bileşenlerinin su ile yaptığı reaksiyon sonucunda ortaya çıkan hidrate bileşenlerde su dört şekilde bulunmaktadır. Bunlar serbest su, adsorbsiyon suyu, hidratasyon veya kristalleşme suyu ve oluşma suyudur (Baradan vd 2012).

- Serbest su: Bir cismin boşluklarında bulunan sudur. Buharlaşma ile bu suyu ortadan kaldırmak mümkündür.
- Adsorbsiyon suyu: Cisimlerin yüzeyi tarafından Van der Waals kuvvetleri ile tutulan sudur. Bu suyun cismin kimyasal bileşimi ile ilgisi yoktur.
- Hidratasyon veya kristalleşme suyu: Bu haldeki su cismin yapısında yer almasına rağmen, cisim ile su arasında kimyasal bir bağ yoktur. Su molekülü cismin molekül sisteminde belirli bir şekilde yer almıştır ve suyun uzaklaştırılması ile cismin fiziksel yapısı tamamen bozulur. Çimento bileşenlerinin su ile yaptığı reaksiyonlarda meydana gelen hidrate elemanlarda su bu şekilde bulunmaktadır.
- Oluşma suyu: Bu durumda su molekül olarak değilde tek valanslı ve negatif elektrikle yüklü olarak cisim içinde yer alır. Suyun uzaklaştırılması ile cismin yapısı tamamen bozulur.

Sertleşmenin başlangıcında suyun yaklaşık yarısı adsorbe sudur. Zamanla hidratasyon ilerledikçe adsorbe suyun kalınlığı azalarak, su hidratasyon ve oluşma suyu haline

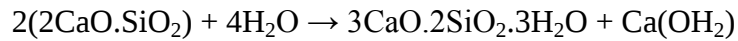
dönüşür. Böylece hidrate elemanların miktarının artmasıyla dayanım zamanla artış gösterir.

Çimentoya özelliklerini kazandıran dört ana karma oksit  $C_3S$ ,  $C_2S$ ,  $C_3A$  ve  $C_4AF$ 'dir. Bunlar içerisinde trikalsiyum silikat ( $C_3S$ ), çimentonun en önemli kısmı olup hızlı sertleşme ve yüksek beton dayanımı sağlar (Sverak *et al.* 2013).

Trikalsiyum silikatın ( $C_3S$ ) reaksiyonu sonucunda kalsiyum silikat hidratlar (C-S-H) ve serbest kireç oluşmaktadır ( $Ca(OH_2)$ ). Serbest kirecin mekanik dayanımı düşüktür. Bu dayanım düşüklüğü çimentonun da dayanımının düşmesine sebebiyet vermektedir. Ayrıca serbest kireç suya maruz kaldığında çözünür ve boşluklu bir yapı ortaya çıkarır. Boşluk ise betonun dayanım ve durabilite özelliklerini olumsuz etkileyen ana sebeplerdendir. Oluşan boşluklar betonu dış etkilere karşı zayıflatır. Trikalsiyum silikatın ( $C_3S$ ) hidratasyon denklemi aşağıdaki şekildedir:

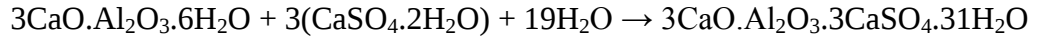
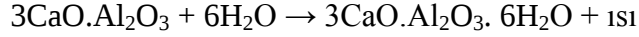


Dikalsiyum silikatın ( $C_2S$ ) hidratasyonu sonucunda da aynı ürünler meydana gelmesine rağmen aralarında birkaç fark bulunmaktadır.  $C_2S$  hidratasyonu için gerekli su miktarı  $C_3S$  hidratasyonu için gerekli su miktarından daha azdır.  $C_2S$  hidratasyonu sonucunda oluşan kireç miktarı  $C_3S$  hidratasyonu sonucunda oluşan kireç miktarından da az olmaktadır. Bir üçüncü fark ise  $C_2S$  reaksiyon hızının  $C_3S$  reaksiyon hızına göre düşük seviyelerde olmasıdır. Dikalsiyum silikatın ( $C_2S$ ) hidratasyon denklemi aşağıdaki şekildedir:



Trikalsiyum Alüminat ( $C_3A$ ) ise çimentonun kimyasal etkilere karşı dayanıklılığını yönlendiren bileşendir.  $C_3A$  prize ilk başlayan ögedir ve yüksek miktarda hidratasyon ısıyı açığa çıkarır. Çimentonun erken priz almasını önlemek ve silikatların oluşmasına imkan vermek için  $C_3A$  bileşeninin prizini yavaşlatmak gerekir. Bu da çimento üretim

aşamasında klinkere katılan alçı taşı ile sağlanmaktadır. Trikalsiyum Alüminatın ( $C_3A$ ) hidratasyon denklemleri aşağıdaki şekildedir:



Burada ikinci sıradaki denklem  $C_3A$  nın alçı taşıyla yaptığı birleşimi göstermektedir. Bu birleşimden oluşan  $3CaO.Al_2O_3.3CaSO_4.31H_2O$  (etrenjit) kararlı bir yapıya sahiptir ve büyük bir hacim kaplar. Etrenjit oluşumundaki bu hacim büyümesi çimento hamurunun plastik kıvamda olduğu zamanlarda gerçekleştiğinden bir sakınca doğurmamaktadır.

Tetrakalsiyum Alüminoferritin ( $C_4AF$ ) hidratasyonu ( $C_3A$ )'nın hidratasyonuna benzerdir. Hidratasyon hızı ( $C_3A$ )'nın hidratasyon hızından düşüktür (Baradan vd 2012).

Şekil 2.1'den görüldüğü üzere ( $C_3S$ ) ve ( $C_2S$ ) çimentoların dayanımı için daha etkili bileşiklerdir. Yaklaşık dört haftaya kadar ( $C_3S$ ) bileşeni dayanımı yönlendirirken, dört haftadan sonra ( $C_2S$ ) bileşeni dayanıma büyük oranda katkı sağlamaya başlamaktadır.  $C_3S$  ve  $C_2S$ , yaklaşık bir yıllık yaştaki nihai güce yaklaşık olarak eşit katkıda bulunurlar.  $C_3A$  ve  $C_4AF$  bileşenleri dayanıma çok fazla etki etmezler yalnız hidratasyon olaylarının gerçekleşmesinde pay sahibidirler (Zhang 1994).

### 2.1.5. Portland çimentosunun bileşimi

Çimento, su ile karıştırıldığında hidratasyon reaksiyonları gerçekleştiren ve bu hidratasyon reaksiyonları sonucunda ortaya çıkan ürünler nedeniyle priz alan ve sertleşen bir hamur (pasta) meydana getiren ve sertleşme sonrası suyun altında bile dayanımını ve kararlılığını koruyan, inorganik ve ince öğütülmüş hidrolik bağlayıcıdır (TS EN 197-1). Beton yapımında kullanılan çimentolar bu su içinde priz alma ve dayanım kazanma

özelliklerinden ötürü hidrolik bağlayıcı adını alırlar. Portland çimentoları da hidrolik bağlayıcılar grubunun başlıca üyesidir. Neville (1986) tipik bir çimento örneğinin oksit analizini ve bileşen miktarlarını Çizelge 2.2'deki şekilde olduğunu belirtmişlerdir

**Çizelge 2.2.** Tipik bir portland çimentosunun oksit analizi ve bileşen miktarları (Neville 1986)

| Oksitler                           | Çimento kimyasına göre sembolü | Miktarı % | Ana bileşen miktarı   |
|------------------------------------|--------------------------------|-----------|-----------------------|
| CaO                                | C                              | 63        |                       |
| SiO <sub>2</sub>                   | S                              | 20        | C <sub>3</sub> S=54,1 |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>     | A                              | 6         | C <sub>2</sub> S=16,6 |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>     | F                              | 3         | C <sub>3</sub> A=10,8 |
| MgO                                | M                              | 1,5       | C <sub>4</sub> AF=9,1 |
| SO <sub>3</sub>                    | S                              | 2         |                       |
| Na <sub>2</sub> O+K <sub>2</sub> O | N+K                            | 1         |                       |
| Kızdırma kaybı                     | K.K.                           | 2         |                       |
| Çözünmeyen kalıntı                 | Ç.K.                           | 0,5       |                       |
| Diger                              | -                              | 1         |                       |

TS EN 197-1'e göre ülkemizde üretilen portland çimentolarının içindeki kimyasal bileşim sınırları şöyledir: Klorür muhtevası %0,1'den, SO<sub>3</sub> miktarı %3,5-%4'ten, MgO muhtevası %5'ten, kızdırma kaybı %5'ten, çözünmeyen kalıntı miktarı %5'ten fazla olmamalıdır. Ayrıca CEM çimentosunda CaO ve SiO<sub>2</sub> oranlarının toplamı kütlece en az %50 olmalı, kütlece CaO/ SiO<sub>2</sub> oranı ikiden az olmamalıdır.

## 2.2. Agregalar

Agrega beton üretiminde kullanılan kum, çakıl, kırmataş gibi malzemelerdir. Agregalar betonun hacim olarak %60-%75'ini, ağırlık olarak da %79-%85'ini oluştururlar. Yüksek oranda hacim kaplaması bir seviyeye kadar karışımların kalitesini ve ekonomikliliğini artırır. Betonun birçok mekanik ve fiziksel özelliği, muhtevasında

bulunan agregaların özelliklerine göre değişkenlik göstermektedir (Mamlouk and Zaniewski 2006).

Betonda kullanılan agregalar, sert, temiz, yüksek dayanımlı ve kimyasal etkilere karşı dayanıklı olmalıdır. Agregalar; kil, silt, organik madde içermemelidir. Agregaların yüzeylerinde bulunan bu malzemeler çimento hamuru ile agregalar arasındaki bağı zayıflatır ve betonun su ihtiyacını artırır. Ayrıca organik maddelerin çimento hidratasyonunda olumsuz etkileri vardır.

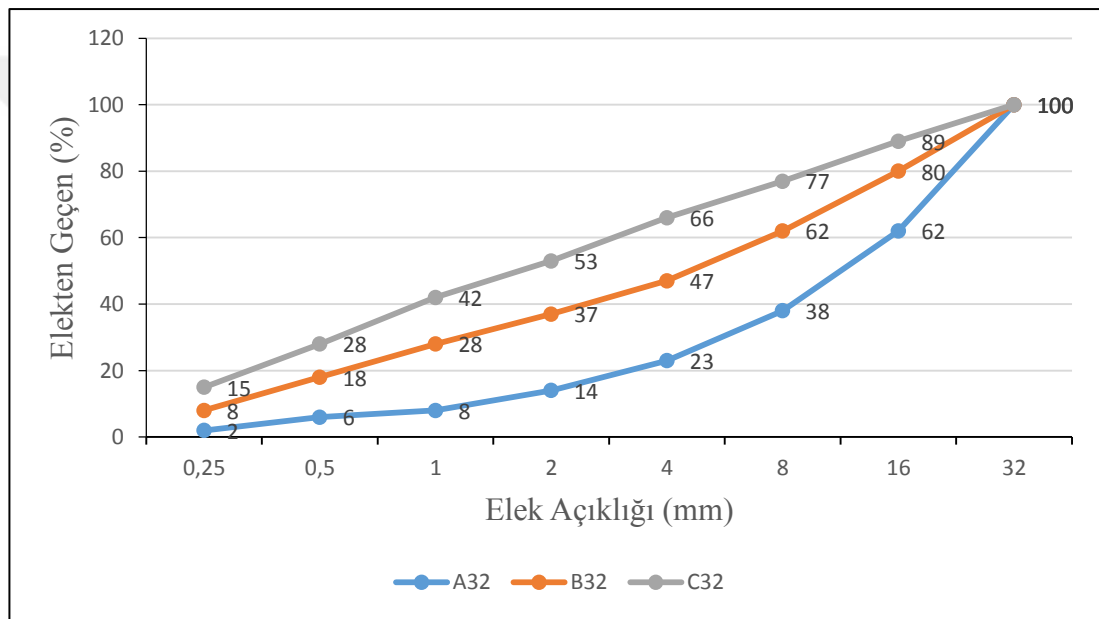
### **2.2.1. Agregaların kaynakları**

Agregalar genel olarak; doğal agregalar, işlenmiş doğal agregalar ve yapay agregalar olarak sınıflandırılmaktadır. Doğal agregalar ocak ve derelerden temin edilen çakıl ve kumlardır. Çakılların boyutu 31,5 mm ile 4 mm arasında değişirken, kumlar ise 4 mm'den daha küçük parçacıklardan oluşmaktadır. İşlenmiş doğal agregalar ise ana kayaların ve büyük taşların kırılarak uygun boyutlara getirilmesiyle oluşturulurlar. Bu şekilde üretilen agregaların yüzeyleri pürüzlü ve köşelidir. Bu durum çimento harcı ile agreganın daha iyi bağlanmasını sağlar. Yapay agregalar ise genelde bir cevherin rafine edilmesi işleminde oluşan bir yan ürün olup malzemelerin hem fiziksel hem de kimyasal başkalaşımı sonucunda oluşurlar. Demir cevherinin işlenmesi sırasında ortaya çıkan yüksek fırın cürufu en çok kullanılan yapay agregalardan biridir.

### **2.2.2. Agregaların tane boyutu**

Betonun dayanımını etkileyen önemli bir unsur da içerisindeki agregaların boyut ve dağılımlarıdır. Bir agreganın tanesinin içinden geçebildiği en küçük göz açıklıklı eleğin çapı ve ya kenar uzunluğu bu tanenin çapıdır. Bir agreganın örneğinde boyutları belirli bir limitler içinde kalan tanelerin ne oranda olduğunu bu örneğe ait 'granülometri bileşimi' açıklar.

Beton içerisindeki agregalar arasındaki boşlukların küçük boyutlarda olması istenilen bir durumdur. Bu sebeple kullanılacak agregalarda belli sınırlamaların olması gerekir. TS 802 (Beton Karışımı Hesap Esasları)'de betonun kullanılacağı yer ve içerisindeki donatı aralıklarına göre seçilebilecek en büyük agrega tane büyüklüğü ( $D_{max}$ ) verilmiştir. Yine aynı standartta tane büyüklüklerine göre karışımda bulunması gereken agrega miktarlarının sınırlarını gösteren değerler Şekil 2.2'de A, B ve C eğrileriyle ifade edilmiştir.



**Şekil 2.2.** Agregada en büyük tane boyutu 32 mm olan betonlar için belirlenen gradasyon eğrileri

### 2.3. Beton Karma Suyu

Beton üretiminde kullanılacak su temiz, berrak ve kokusuz olmalıdır. Su içerisinde kil, silt, organik madde, asit, klorür, sülfat, yağ ve endüstri atıkları gibi maddelerin çok fazla bulunmaması gerekir. TS EN 1008, beton üretiminde temiz ve içilebilir nitelikte suların kullanılması gerektiğini belirtmektedir. Beton karma suyunun iki ana işlevi vardır:

- a-Çimento ile birlikte hidratasyon olayını başlatmak ve devam ettirmek
- b-Taneleri ıslatarak taze betonda işlenebilmeyi sağlamak

Karışım suyunun az ya da çok olması betonun dayanım ve dayanıklılığını etkiler. Bu yüzden karışıma katılacak su miktarı bu parametreleri olumsuz yönde etkilemeyecek ve işlenebilirliği de sağlayacak şekilde tespit edilmelidir.

## 2.4. Puzolanlar

### 2.4.1. Puzolanların tanımı

Puzolanlar, kendileri çok az çimentolama özelliğine sahip olan veya hiç olmayan, ancak çimentolu özelliklere sahip bileşikler oluşturmak için normal sıcaklıkta kalsiyum hidroksit ile kimyasal olarak reaksiyona giren silisli veya silis-alüminli malzemeler olarak tanımlanmaktadır (Nair *et al.* 2008).

Puzolanlar muhteviyatında yüksek miktarda silika içeren malzemelerdir. Kalsiyum hidroksit  $\text{Ca}(\text{OH}_2)$  ile reaksiyona girerek betona geçirimsizlik ve durabilite özelliklerinde iyileşme sağlayacak yapıları oluştururlar (Gerwick 1997). Puzolanik karakterli malzemeler  $\text{Ca}(\text{OH}_2)$  ile reaksiyona girerek beton özelliklerini iyileştirebildiği gibi filler etkisi (boşlukları doldurma) ile de betonun birçok özelliğini geliştirebilmektedir (Şengül vd 2007).

Puzolanların birçoğunun kendi başlarına bağlayıcılık özelliklerinin olmamasının nedeni portland çimentosundan farklı olan kimyasal bileşimleridir. Puzolanlar silikat ( $\text{SiO}_2$ ) esaslı iken, portland çimentosu  $\text{CaO}$  esaslıdır. Bu nedenle ikincil bağlayıcılar olarak nitelendirilirler (Alkaya 2009).

Puzolanların hidratasyon sonucunda ortaya çıkan hidratasyon ürünlerini olumlu yönde etkileme kapasiteleri vardır. Beton bileşenlerinden biri olan hidratlanmış çimento matrisi betonun yapısında önemli bir yer tutar. Puzolanlar matristeki hidratasyon ürünleri miktarını değiştirerek beton yapısını güçlendirirler (Demirboğa vd 2001).

Uygun özelliklerdeki puzolanların beton üretiminde kullanılması ekonomik, çevresel ve teknik yönden bir çok avantaj sağlamaktadır. Puzolanlar çimento üretim aşamasında klinkere katılarak öğütülürler. Bu da daha az ana hammadde ve enerji ile çimento üretimi anlamına gelmekte ve doğaya daha az sera gazı salınımına imkan vermektedir. Ayrıca puzolanlar betonda dayanım, dayanıklılık, işlenebilirlik özellikleri üzerinde olumlu yönde yararlı olabilmektedirler. Günümüzde doğal ve yapay olarak bir çok puzolanik madde ekolojik faydaları ve beton özelliklerinde çeşitli faydalar sebebiyle tercih edilmektedir.

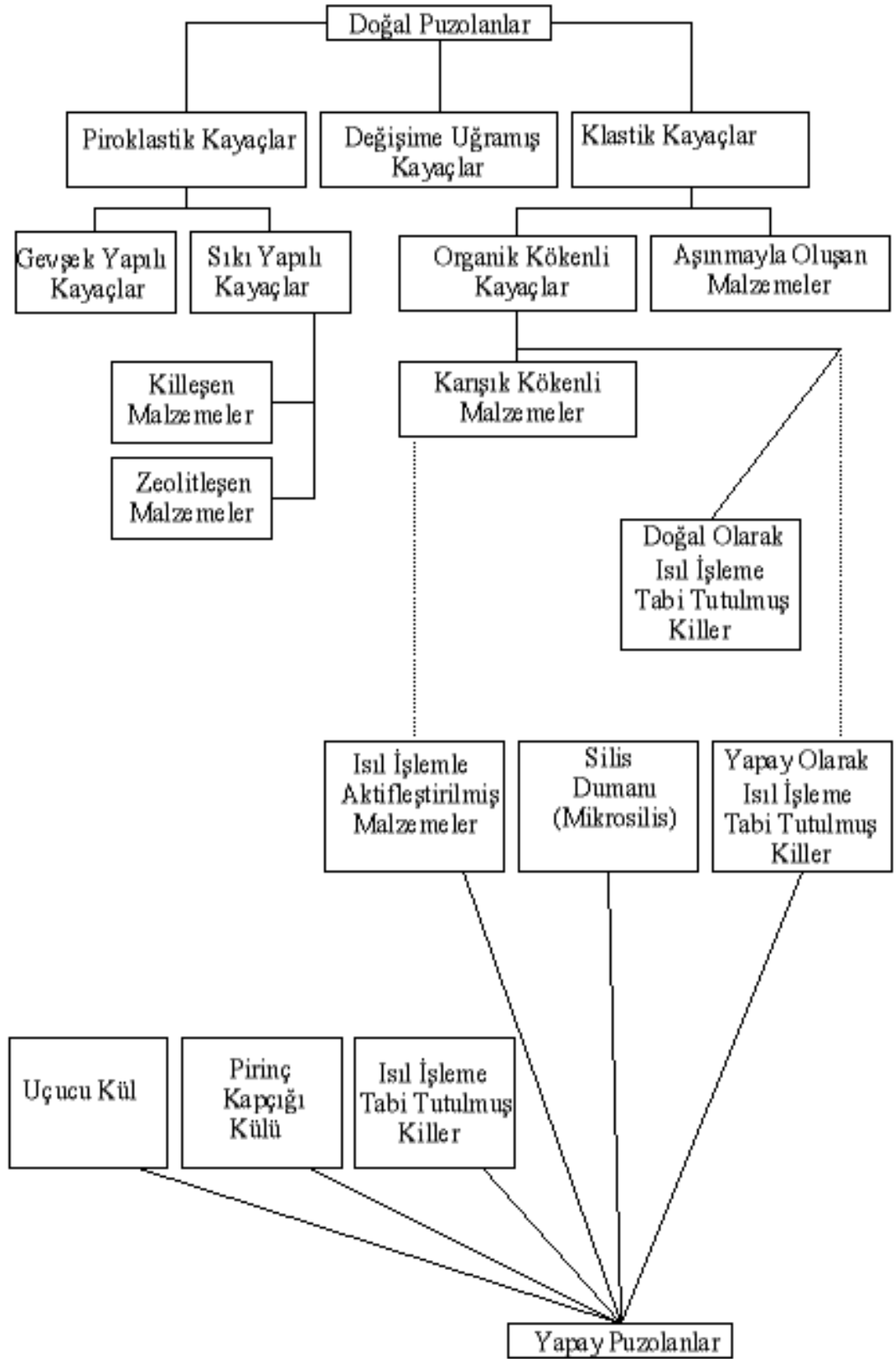
#### **2.4.2. Puzolanların sınıflandırılması**

Puzolanlar oluşum şekillerine göre doğal ve yapay olmak üzere ikiye ayrılırlar. Doğal puzolanlar volkanik kökenli malzemelerdir. Doğal puzolanlar, volkanik kökenli doğal puzolanlar ve ısıtılmış işlem görmüş killeri- diatomitler olarak iki başlıkta incelenmektedir.

Volkanik kökenli doğal puzolanlar erimiş magmanın püskürmesi sonucu oluşurlar. Isıtılmış işlem görmüş killeri ve diatomitler, ısıtılmış işlem sonucunda puzolanik özellik kazanan malzemeler bu sınıfı oluşturur.

Isıtılmış işlem görmüş doğal puzolanlar ve çeşitli endüstrilerin atık maddeleri olan uçucu kül, silis dumanı, pirinç kabuğu külü gibi maddeler ise yapay puzolan grubunu oluştururlar.

Puzolanlar bir çok farklı şekilde sınıflandırılmıştır. Koçak (2008) bunlar içinde puzolanların kökenini temel alan sınıflandırma şeklini aşağıdaki şekilde belirtmiştir.



Şekil 2.3. Pozolanların sınıflandırılması (Koçak 2008)

Massazza bu sınıflandırmasında doğal puzolanları 3 ana gruba ayırmıştır. İlk grup olan piroklastik, magmanın dışarı atılması ile biçimlenen ve kimyasal bileşimi magmanın bileşimine bağlı olan bir puzolandır. Dışarı atılan magmanın hızlı soğuması sonucunda içinde gaz kabarcıkları bulunan camsı bir malzeme meydana gelmektedir.

İkinci grup, değişime uğramış yüksek silisli malzemelerden meydana gelmektedir. Bu puzolanlar, suda eriyen oksitleri sebebiyle kimyasal değişime uğrayan kayaların, durgun sularda farklı orijinli malzemelerle birlikte çökmesiyle şekillenirler. Bunlar, genelde kil ile karışık olarak bulunmaktadır.

Üçüncü grup ise, kil ve diatomit toprağını içine alan klastik kaynaklıdır. Kilin tam bir puzolanik davranış gösterememesi, bağlayıcı ikame malzemesi olarak kullanılmasının önüne geçmektedir. Ancak, uygun sıcaklıklarda yapılan kalsinasyon ile kilin puzolanik özelliği önemli miktarda yükseltilebilmektedir.

Massazza'nın bu sınıflandırmasına göre yapay puzolanlar ise Uçucu kül, pirinç kapçığı külü, ısıtılma tabi tutulmuş killer, ısıtılma ile aktifleştirilmiş malzemeler, silis dumanı (mikrosilis), yapay olarak ısıtılma tabi tutulmuş killer olmak üzere 6 gruba ayrılmaktadır (Koçak 2008).

#### **2.4.3. Puzolanların aktivitesi**

Puzolanik aktivite, nemin varlığında kalsiyum hidroksit (CH) ile reaksiyona girmelerinin bir sonucu olarak puzolanik malzemelerin bağlama özelliğine sahip bileşenler üretme kabiliyetidir. Bu aktivite kavramı bir puzolanın en fazla ne kadar  $\text{Ca(OH)}_2$  bağlayabileceğini ve bu bağlanmanın hızını göstermektedir. Aktivite, puzolanların özelliklerine ve içerisinde bulunan aktif fazların kalite ve miktarına bağlıdır. Puzolanların heterojen bir yapıya sahip olmaları ve hidrasyonlarının da karmaşık bir yapıya sahip olması nedeniyle aktivitelerini açıklayacak bir model geliştirilememektedir. Bu hususta ancak genel eğilimler açıklanabilir.

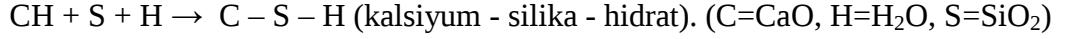
Bunlardan bazıları:

- Bir puzolanik malzemenin bağladığı  $\text{Ca(OH)}_2$  miktarı, bu malzemenin içerisindeki aktif madde miktarının bir göstergesidir. Diğer özellikler aynı kalmak üzere bağlanan  $\text{Ca(OH)}_2$  miktarı fazla ise bu puzolandaki aktif madde miktarı da fazladır.
- Bir puzolanın erken zamanlardaki aktivitesi bu puzolanın özgül yüzey alanına, daha ileri dönemlerdeki aktivitesi ise kimyasal ve mineralojik kompozisyonuna bağlıdır.
- Bir puzolanın aktif fazlarının içerisindeki  $\text{SiO}_2$  miktarı, bağlanan  $\text{Ca(OH)}_2$  miktarını etkilemektedir.
- Belirli limitler dahilinde kireç-puzolan karışımlarında, kireç/puzolan oranının artması  $\text{Ca(OH)}_2$  bağlanmasını da artırır.
- Puzolanlar tarafından bağlanan kireç miktarı, ortamda bulunan su miktarının artmasıyla artar (Koçak 2008).

Puzolanik malzemenin yeterli aktiviteyi gösterebilmesi için, yeterince ince taneli olması, amorf yapıya sahip olması ve yeterli miktarda “silis + alümin + demir oksit” içermesi gerekmektedir (Erdoğan 2007). Martirena and Monzo (2018) çimento-puzzolan karışımlarının basınç dayanımını, reaktiviteyi kanıtlamanın en etkili göstergesi olduğunu ifade etmişlerdir.

#### 2.4.4. Puzolanik reaksiyon ve reaksiyon ürünleri

Puzolanlar büyük oranda silis ve alüminden oluşmaktadır. İnce daneli haldeki puzolanlar, nemli ortamlarda söndürülmüş kireç ve suyla bir araya geldiğinde, aralarında birtakım kimyasal reaksiyonlar gerçekleşmektedir. Kalsiyum hidroksit, silis ve su arasında oluşan reaksiyonlar sonucunda, hidrolik bağlayıcılık özelliğine sahip kalsiyum – silika - hidrat (C - S - H) jelleri oluşmaktadır. Kalsiyum hidroksitin puzolanın silisi ile biraraya gelerek oluşturduğu kimyasal reaksiyonun basit hali aşağıda verilmiştir (Erdoğan 2007).



Kireç ile doğal puzolanların reaksiyonu sonucunda genel olarak aşağıdaki verilen ürünlerin ortaya çıktığı kabul edilmektedir.

- C-S-H formatında kalsiyum silikat hidratlar,
- C4 ASH<sub>x</sub> formunda kalsiyum alüminat hidrat, (X, 9-13 arasında değişken)
- Hidrate olmuş gehlenit, C2ASH8
- Kalsiyum karboalüminat, C3A.CaCO3H12
- Etrenjit, C3A.3CaSO4.H32
- Kalsiyum alüminat monosülfat, C4A.CaSO4.H12

Bunlarla birlikte, bütün ürünler aynı zamanda bulunmayabilirler. Bulunmaları ise kirecin kalsiyum hidroksit kullanılabilmesine, hidratasyon reaksiyonlarının derecesine, hidratasyon sırasında çevre koşullarına, puzolanın kimyasal ve mineralojik bileşenlerine bağlı olmaktadır (Koçak 2008).

#### 2.4.5. Puzolanların beton özelliklerine etkileri

Puzolanlar betonda çoğu zaman çimentonun bir kısmı yerine (ikame) kullanılmaktadır. Karışıma konulacak çimento azaltılmakta, azaltılan miktarda puzolan karışıma ilave edilerek temel malzemelerle (çimento, agrega, su) karıştırılmaktadır. Puzolanlar genellikle çimento ağırlığının %10-%50'si kadar ikame edilmektedirler (Erdoğan 2007).

Mineral katkıları kullanılmasıyla çökme değeri sabit tutulduğunda genellikle beton karışımlarının su ihtiyacı artmaktadır. Betonun işlenebilme özelliğini olumsuz etkileyen bu durum kimyasal katkıları kullanılarak giderilebilmektedir.

Puzolanik malzemelerin özgül ağırlığı çimentonun özgül ağırlığından daha azdır. Bu nedenle ikame edilen puzolanlarla beraber karışımdaki bağlayıcı madde (çimento ve

puzolan) hacminde artış olmaktadır. Bağlayıcı hacminin artması daha iyi işlenebilen, akıcı bir beton elde edilmesini sağlar.

Beton priz süresi karışıma eklenen mineral katkının tipi, miktarı ve inceliğine bağlı olmakla beraber genellikle karışımdaki çimento miktarı azaldığından artış göstermektedir.

Beton karışımında ince tanelerin miktarlarının artması karışımdaki katı malzemelerin yüzey alanının da artması anlamına gelmektedir. Artan yüzey alanı sayesinde taze betonda su katı taneler tarafından daha çok tutulmakta ve terleme olayı da azalmaktadır.

Çimentonun suyla girdiği reaksiyon sonucunda ısı açığa çıkar. Bu ısı özellikle kütle betonlarında ilk zamanlarda genleşmeye, ilerleyen zamanlarda ısının düşmesiyle büzülme ve çatlaklara sebebiyet vermektedir. Betonda kullanılan puzolanlar karışımdaki çimento miktarını azalttığından hidrasyon ısıısının da daha düşük seviyelerde kalmasına olanak sağlar.

Betonların donmaya karşı direnç gösterebilmesi için hava sürükleyici katkıları kullanılmaktadır. Puzolan katkılı betonlarda kullanılan hava sürükleyici katkı miktarı kullanılmayan betonlara nazaran daha fazla olmaktadır.

Betonda çimento hamurunun kazanabileceği dayanımın hızı ve miktarı, hidrasyon sonucunda oluşan C-S-H jellerine bağlıdır. Bu jel ne kadar çok olursa hamurun dayanımı o kadar yüksek, ne kadar erken oluşursa hamur o kadar erken dayanım sergilemektedir. Karışımda ilk olarak çimento suyla reaksiyona girmekte ve bağlayıcılık sağlayan C-S-H jeli ile birlikte kalsiyum hidroksit açığa çıkmaktadır. İkinci aşamada ise karışımdaki puzolanlar kalsiyum hidroksitle reaksiyona girerek yeni C-S-H jellerinin ortaya çıkmasını sağlamaktadır. Bu nedenle puzolan kullanılarak üretilen bir betonun ilk zamanlardaki dayanımı, puzolan kullanılmamış betona göre daha düşüktür. Fakat ilerleyen zamanlarda yeni C-S-H jellerinin oluşması ile puzolanlı beton puzolansız

beton dayanımının üzerine çıkabilmektedir. Bu artış puzolan tip ve miktarıyla yakından alakalıdır.

Beton karışımlarında kullanılan ince taneli malzemeler beton içerisindeki boşlukların daha az olmasını sağlamaktadır. Daha az boşluk daha az su geçirimsliliği olan beton anlamına gelmektedir.

Çimento içerisindeki alçıtaşı,  $C_3A$  bileşeni ve suyun biraraya gelmesiyle oluşan hidratasyon reaksiyonları sonucunda yarı kararlı kalsiyum alumino monosülfhidrat ile kalsiyum alumino trisülfhidrat (etrenjit) oluşmaktadır. Etrenjitin büyük genleşme kapasitesi vardır. Sertleşmiş betonun içerisine sızabilecek sülfat sebebiyle kalsiyum hidroksitin bir bölümü alçıtaşına dönüşmektedir. Alçıtaşı, kalsiyum alumino monosülfhidrat ve su arasında reaksiyon gerçekleşmekte ve etrenjit oluşmaktadır. Oluşan etrenjit de betonda genleşme yaratmaktadır. Puzolanlı üretilen beton içerisinde daha az çimento ve haliyle daha az  $C_3A$  olması betonun sülfatlara karşı dayanımının daha fazla olmasını sağlamaktadır.

Çimentonun içerisinde bulunan alkalilerle reaktif silika içeren agregalar arasında oluşan alkali-agrega reaksiyonları sonucunda alkali-silika jelleri oluşur. Büyük genleşmelere neden olan bu jeller betonun dayanıklılığını azaltmaktadır. Puzolanlı betonda çimentonun daha az olması daha az alkali varlığı demektir. Bu da betonun alkali silika etkilerine karşı daha dayanıklı olması anlamına gelmektedir.

Puzolanlar, betonun işlenebilmesini, dayanımını, dayanıklılığını artırması yanında ekonomikliğini de artırmak amacıyla tercih edilmektedir. Betonlu oluşturan malzemeler arasında bulunan çimento beton maliyetini artıran başlıca bileşendir. Bu sebeple puzolan kullanılarak üretilen betonların daha az çimento içermesi ekonomik olarak da avantaj sağlamaktadır.

## 2.5. Pirinç Kabuğu Külü

Çeltik, dünyada en çok üretilen tahıllardan biridir. Fabrikalarda işlenen çeltik pirinç haline gelir. Dünya nüfusunun büyük bir kısmının besin maddesini oluşturan pirinç, dünya genelinde ekilebilen alanların yaklaşık %11'inde ekilmektedir.

### 2.5.1. Pirinç üretimi

Pirinç özellikle Çin, Hindistan, Endonezya gibi Asya ülkelerinde önemli bir besin kaynağıdır. Dünya genelinde yaklaşık olarak yılda 760 Milyon ton çeltik üretilmektedir. Ayrıca bu üretimin artarak devam edeceği de görülmektedir (Sung 2019). Dünya genelinde çeltik tarımı yapan ülkelerin yıllık çeltik üretim miktarları Çizelge 2.3'de verilmiştir (Anonim 2018c).

Türkiyede de çeltik üretim miktarları artan bir seyir izlemektedir. 2018 yılında ülkemizde 118 100 Hektarda 940 000 Ton çeltik üretimi yapılmıştır. Son yıllarda üretilen çeltik miktarları Çizelge 2.4'de verilmiştir (Anonim 2019).

**Çizelge 2.3.** Çeltik üretim miktarları

|           | Çeltik Üretim Miktarı (Milyon ton) |       |       |      |
|-----------|------------------------------------|-------|-------|------|
|           | 2015                               | 2016  | 2017  | 2018 |
| Çin       | 210                                | 209   | 210   |      |
| Hindistan | 157                                | 163   | 166   |      |
| Endonezya | 73                                 | 73    | 74    |      |
| Dünya     | 740,3                              | 751,9 | 758,9 |      |
| Türkiye   | 0,92                               | 0,92  | 0,90  | 0,94 |

**Çizelge 2.4.** Türkiye'de çeltik üretimi

| Yıllar | Ekiliş Alanı (Ha) | Üretim (Ton) | Verim (Kg/Da) |
|--------|-------------------|--------------|---------------|
|--------|-------------------|--------------|---------------|

|      |         |         |     |
|------|---------|---------|-----|
| 2014 | 110 884 | 830 000 | 764 |
| 2015 | 115 856 | 920 000 | 794 |
| 2016 | 116 046 | 920 000 | 793 |
| 2017 | 110 000 | 900 000 | 818 |
| 2018 | 118 100 | 940 000 | 796 |

Çeltik tarımı ülkemizde Edirne, Çanakkale, Balıkesir, Samsun, Çorum gibi illerimizde yoğun olarak yapılmaktadır. Bu illere göre daha düşük miktarlarda olsa da Artvin ilinin Yusufeli ilçesinde de çeltik tarımı yapılmaktadır. Artvin valiliği verilerine göre Yusufeli ilçesinde 380 Dekar alanda yılda yaklaşık 450 Ton çeltik üretilmektedir (Anonim 2017a).

### 2.5.2. Pirinç kabuğu

Elde edilen çeltik fabrikalarda işlenmesinden sonra pirinçten arda kalan ürün pirinç kabuğu olarak adlandırılır. Üretilen çeltiğin %20'si pirinç kabuğu olarak alınır. (Khan 2018) Yıllık üretimin 760 Milyon ton olduğu düşünüldüğünde bunun 150 Milyon tondan fazlası kabuk olarak alınması anlamına gelmektedir. Atık olarak alınan bu kabukların imha edilmesi de başlı başına bir problem teşkil etmektedir.

Çöp olarak atılan kabuklar çok fazla alan kaplayabilir ve bölgenin kullanım alanını kısıtlar. Yakılarak bertaraf edilmesi durumunda ise, küller çevre bölgelere yayılacak, kirlilik yaratacak ve toprağın güzelliğini tahrip edecektir. Pirinç kabuğu mikro organizmalar tarafından fermente edildiğinde, metan gazı salınımı olur ve bu da küresel ısınma problemine yol açmaktadır. Düşük besin değerleri nedeniyle pirinç kabuğunun hayvanlar için bir yem olarak kullanılması da uygun değildir. Pirinç kabuklarının yüksek silis içeriği sebebiyle doğal yollarla bozulması da sınırlı kalmaktadır. Bir çok yerde pirinç kabuklarından yakıt olarak da faydalanılmaktadır (Thomas 2018).

### 2.5.3. Pirinç kabuğu külü

1960'lı yılların sonundan bu yana, pirinç kabuğu külünün çimento betonunda, sıradan portland çimentosu ve / veya ince agregaların kısmi bir ikame maddesi olarak kullanılması konusunda çok sayıda araştırma yapıldı. Mevcut literatürlere göre, 1973 yılında Mehta çimentolu malzemeler üzerine pirinç kabuğu külü araştırmalarına başlamıştır. Mehta'nın çalışmalarına dayanarak, ilerleyen zamanlarda fırınlar tasarlanarak pirinç kabuklarının kontrollü yanması sağlandı. Fırınlama sırasında pirinç kabuğunun yanma sıcaklığı ve yanma süresi kontrol edildiğinde yüksek pozolanik özellikte pirinç kabuğu külü üretilbileceği belirlenmiştir. O zamandan beri, dünya genelinde pirinç kabuğu külünün uygulanması konusunda birçok araştırma yapılmıştır (Thomas 2018).

### 2.5.4. Pirinç kabuğu külü ile ilgili yapılan çalışmalar

De souza *et al.* (2011), yanma koşullarının pirinç kabuğu külleri üzerine etkisi üzerinde yaptıkları çalışmada kontrolsüz yanma ile bir tür kül elde etmişler, daha sonra bu külü kontrollü olarak tekrar yakarak ikinci bir tür kül elde etmişlerdir. Birinci tür küller daha kolay öğütülmüş ve daha yüksek yüzey alanına sahip olmasına karşın, içerisindeki yüksek karbon oranına bağlı olarak reaktifliği ikinci tür küle oranla daha düşüktür.

Kang *et al.* (2019), PK küllerinin kontrollü yakma ve kontrolsüz yakma olarak iki farklı şekilde elde edildiği çalışmada küllerin yakma koşullarının beton özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Kontrolsüz yakma ile elde edilen küller siyah renkte ve içerisindeki karbon miktarı fazladır. Gözenek yapısının ve basınç dayanımının incelendiği çalışmada karbon içeriğinin fazla olduğu küllerin hedeflenen dayanımdan daha düşük bir dayanım gösterdiği görülmüştür.

Sensale (2006), yakma koşullarının pirinç kabuğu külü üzerindeki etkilerini araştırmaya yönelik yaptığı çalışmada iki farklı yolla elde ettiği külleri betonda %10 ve %20 oranlarında çimento yer değiştirme malzemesi olarak kullanmıştır. Yakıt olarak yakılan

kabuklardan elde edilen küller ve kontrollü yakma ile elde edilen küllerin kullanıldığı örneklerde tüm yaşlarda kül ikameli örnekler kontrol betonlarından daha yüksek basınç dayanımı göstermişlerdir.

Bie *et al.* (2015), çalışmalarında pirinç kabuklarının yanma koşulları ve PK külü karışım miktarlarının harçların mekanik özelliklerine etkilerini araştırmışlardır. 600°C'de 1 saat, 600°C'de 2 saat ve 700°C'de 1 saat yakılarak elde edilen üç farklı PK külü harçlara %5, %10, %20 oranlarında katılmıştır. Yapılan basınç deneylerine göre en iyi sonucu 600°C'de 2 saat yakılarak elde edilmiş küllerin %10 ikame edildiği harçlar vermiştir. Eğilme dayanımında ise en yüksek değeri 700°C'de 1 saat yakılarak elde edilen kül ikameli harçlar vermiştir.

İşbilir (2012), yaptığı çalışmada PK kül ikameli harçların mekanik özelliklerini incelemiştir. 600°C, 700°C ve 800°C yakılarak hazırlanan küller harçlar içerisine %5, %10, %15 ve %20 oranlarında çimento yerdeğiştirme malzemesi olarak kullanılmıştır. Kül miktarı arttıkça işlenebilirliğin, yoğunluğun ve basınç dayanımlarının düştüğü görülmüştür. 90 gün sonunda yapılan basınç deneyinde ise %5 ikameli harçlar kontrol numunelerinin üzerinde bir dayanım değeri göstermiştir.

Nair *et al.* (2008), çalışmalarında pirinç kabuğu küllerinin reaktifliğine yanma koşullarının ne düzeyde etki ettiğini bulmayı amaçlamışlardır. Pirinç kabukları 500°C, 700°C, 900°C olarak üç farklı sıcaklıkta 15 dakika, 6 saat, 12 saat, 24 saat olarak da 4 farklı sürede yakılmıştır. Soğutma hızının etkisi içinde yavaş soğutma ve hızlı soğutma olarak iki tür soğutma yöntemi uygulanmıştır. Yapılan bu çalışmaya göre 500°C'de 12 saat süreyle yandıktan sonra fırından çıkarılarak hızlı soğutulan küllerin reaktifliğinin en yüksek düzeyde olduğu gözlemlenmiştir.

Abalaka (2012), basit bir PK yakma düzeneğinde hazırladığı külleri çimentonun kısmi yer değiştirme malzemesi olarak kullanmıştır. Çelik sepetleri kullanarak hazırladığı ocakta yaklaşık 800°C sıcaklıkta kabukları yakarak elde ettiği külleri %5, %10, %15, %20 ve %25 oranlarında karışıma katmıştır. Yapılan deneyler sonucunda 90 günlük

kürleme işlemi sonunda çimentonun %25 oranına kadar PK külü ile kısmi yer değiştirme yapılabileceği görülmüştür.

Ramezaniapour *et al.* (2009), pirinç kabuklarının ideal yanma sıcaklığı ve süresini belirlemek üzere yaptıkları bu çalışmada sırasıyla 30, 60 ve 90 dakika yanma süresi ile 550, 600, 650, 700 ve 750°C gibi çeşitli sıcaklıklarda kül ürettiriler . Sonuç olarak, 60 dakika boyunca 650°C'deki yanma işleminin, reaktivite için uygun amorf yapıda kül üretebileceğini ve ayrıca kül üretim zamanından da tasarruf edilebileceğini öne sürdüler.

Habeeb and Fayyadh (2009), pirinç kabuğu küllerinin öğütme miktarının beton özelliklerine etkisini araştırmışlardır. Üç farklı öğütme süresiyle elde edilen küller beton içerisine %20 oranlarında katılmışlardır. 7, 28 ve 90 günlük eğilme ve basınç deney sonuçlarına göre kül katılan örneklerden kontrol numunesine göre daha yüksek değerler elde edilmiştir. Öğütme süresinin artması inceliğin artması küllerin reaktivitesini arttırmıştır.

Jamil *et al.* (2016), pirinç kabuğu külünün fiziksel ve kimyasal olarak betona etkilerini incelik bakımından araştırmışlardır. İnce ve kaba öğütülmüş PK küleriyle harçlar hazırlanmıştır. Pozolanik etkiyi görebilmek adına reaktif olmayan, boyutları küllerin boyutlarına yakın olacak şekilde öğütülen doğal kumlarla da harçlar hazırlanmıştır. Yapılan basınç deneylerine göre ince öğütülmüş külle oluşturulan harçlar en iyi sonucu vermiştir. Bu küller boşlukları doldurma ve pozolanik etkilerinden dolayı basınç mukavemetlerini artırmışlardır. İnce öğütülmüş doğal kum ile hazırlanan numunelerde pozolanik reaksiyon gerçekleşmediğinden dayanım değerleri düşük olmuştur. Kaba öğütülmüş PK küleriyle hazırlanan numuneler ince öğütülmüş PK küleriyle hazırlanan numunelere göre daha az dayanım sergilerken, doğal kum kullanılarak hazırlanan örneklerden daha yüksek bir basınç dayanımı göstermiştir.

Ahsan and Hossain (2018), PK külünün partikül büyüklüğünün beton özelliklerine etkisini araştırmışlardır. Bu kapsamda 600 µm, 150 µm ve 44 µm olmak üzere üç ayrı boyutta kül, beton karışımlarına %10 ve %20 oranlarında ikame edilmiştir. Basınç ve

eğilme deneyleri sonuçlarına göre partikül boyutu büyük olan küllerle hazırlanan harçlar kontrol betonlarına göre daha düşük mukavemet sergilemişlerdir. Partikül büyüklüğü daha küçük olan küllerle hazırlanan harçlar ise kontrol betonundan daha iyi özellikler göstermişlerdir. Buna rağmen hemen hemen tüm harçlar hedeflenen dayanımı sağlayabilmişlerdir.

He *et al.* (2017), ek çimentoama malzemelerinden olan pirinç kabuğu külü kullanılan betonların özelliklerini incelemek için çalışma yapmışlardır. Elde edilen sonuçlara göre, PK külü parçacıklarının, boşlukları ve büyük gözenekleri doldurabilen ve böylece kılcal gözenekler ve boşluklarla ilgili gözenekliliği azaltan ilave C-S-H jeli üretmek için çimento hidrasyonundan kaynaklanan kalsiyum hidroksit ile reaksiyona girebildiğini göstermişlerdir. Ayrıca PK külünün betona eklenmesinin hem basınç dayanımını hem de elastisite modülünü iyileştirebileceğini göstermişlerdir. PK külünün %15 oranına kadar ek çimentolama malzemesi olarak kullanılabileceğini göstermişlerdir.

Ferraro *et al.* (2012), PK külü katkılı betonların dayanım ve durabilite özelliklerini incelemişlerdir. %7,5 ve %15 oranlarında kül ilavesi ile hazırlanan örnekler üzerinde 7, 28 ve 90 gün sonunda deneyler yapılmıştır. Deneyler sonucunda örneklerin su emme ve yoğunluk değerlerinin azaldığı gözlenmiştir. Basınç ve çekme deneyleri sonucunda ise kül ilavesinin basınç ve çekme dayanımları üzerinde olumlu katkı yaptığı görülmüştür.

Rahman *et al.* (2014), PK külünün betona ikame oranının üst sınırını belirlemek için kendiliğinden yerleşen beton örnekleri üzerinde çeşitli deneyler yapmışlardır. Sertleşmiş beton örnekleri üzerinde yapılan basınç, çekme ve su emme değerleri için 3, 7 ve 28 gün sonunda yapılan deneylerde su emme değerinin arttığı, çekme ve basınç dayanımlarının ise azaldığı görülmüştür.

Yıldız vd (2007), PK külü ikamesi ile elde edilen betonların basınç ve eğilme dayanımlarını karşılaştırmışlardır. Uygun şartlarda hazırlanan küller çimento ile yer değiştirme malzemesi olarak kullanılmış, %10'luk bir yer değiştirme oranı ile referans numunelerden daha yüksek bir basınç ve eğilme değeri elde edilmiştir.

Madandoust *et al.* (2011), PK külü katkılı betonların çekme ve basınç özelliklerini incelemişlerdir. Erken yaşlarda kül katkılı betonların çekme ve basınç dayanımları kontrol betonlarına göre düşük olmasına rağmen 360 gün sonunda yapılan deneylerde %20 ikameli betonların kontrol betonlarının üzerinde dayanım sergilediği görülmüştür.

Chopra *et al.* (2015), betonun mekanik özelliklerine katkısını incelemek için PK külünü kullanmışlardır. %10, %15 ve %20 oranlarında çimento yerine PK külü katılmış örnekler üzerinde 7, 28 ve 56 gün sonunda deneyler yapılmıştır. %15 kül ikame miktarına kadar numunelerin çekme ve basınç dayanımlarının kül kullanımı ile arttığı görülmüştür. Beton içerisinde ki gözenek miktarı da en az %15 katkılı örneklerde bulunmaktadır.

Chindaprasirt and Rukzon (2008), PK külünün beton geçirgenliğine ve basınç dayanımına etkilerini incelemişlerdir. Geçirgenlik özelliklerine bakıldığında kül ikamesi ile gözenekliliğin azaldığı gözlenmiştir. Basınç dayanımlarına bakıldığında ise erken yaşlarda %10 ve %20 ikame seviyesinde kontrol numunelerinden daha fazla dayanım sergilerken %40 ikame seviyesinde düşüş varken 90 gün sonunda tüm örnekler kontrol numunesinden daha yüksek dayanım göstermiştir.

Koushkbaghi *et al.* (2019), geri dönüştürülmüş agrega ve pirinç kabuğu kullanarak betonun bazı mekanik özelliklerini incelemişlerdir. PK külü betonun mikro yapısını geliştirdiği, gözenekliliği ve su emilimini azalttığı gözlenmiştir. 28, 90 ve 236 gün sonlarında yapılan deneylerde çekme dayanımında büyük değişimler olmamasına karşın %20 kül ikame edilmiş örnekler diğer özellikler de kontrol betonlarına göre yüksek değerler vermiştir.

Khassaf *et al.* (2014) araştırmalarında pirinç kabuğu külünün, betonun taze ve sertleşmiş özellikleri üzerine etkisini incelemişlerdir. Uygun şartlarda hazırladıkları PK küllerini beton karışımlarında çimentonun ağırlıkça %10, %20 ve %30'u yerine kullanmışlardır. Karışımdaki kül miktarı arttıkça işlenebilirliğin de azaldığı görülmüştür. Yapılan basınç ve çekme deney sonuçlarına göre ise erken yaşlarda PK

külleri betonlarda dayanım da azalmaya neden olurken ilerleyen yaşlarda (56 ve 90 gün) kontrol numunesinden daha yüksek bir basınç ve çekme dayanımı gösterebilmişlerdir. Ancak %30 ikameli örnekler tüm yaşlarda kontrol numunelerinden daha düşük dayanım göstermiştir.

Cordeiro *et al.* (2009), muhteviyatına yüksek oranda karbon içeren PK küllerinin beton özelliklerine etkisini incelemişlerdir. PK külleri betonun basınç dayanımını kontrol betonlarına göre arttırmışlardır.

Khan *et al.* (2018), pirinç kabuğu külünün kimyasal bileşiminin jeolojik, coğrafi ve iklim şartları nedeniyle kaynağa göre değişimini ve bu durumun betonlar üzerine etkisini incelemişlerdir. Analiz toprağın yüksek silis konsantrasyonuna sahip olması PK külünün de silis yüzdesinin fazla olacağını göstermiştir. Farklı bölgelerden elde edilen küller, numunelerin mekanik özelliklerinde de farklılıklar meydana getirmiştir. 90 gün sonundaki basınç deney sonuçlarına göre kontrol numunelerine kıyasla bazı örneklerde %9-10 mertebelerinde artış görülürken bazı örneklerde bu oran %2 civarındadır. Yine eğilme dayanımında da kontrol numunelerine göre %2 ile %7 arasında değişen oranlarda artış gösteren örnekler mevcuttur.

## **2.6. Betonların Genel Özellikleri**

### **2.6.1. Basınç dayanımı**

Basınç dayanımı, betonun üzerine gelecek basınç yüklerine karşı gösterebileceği en büyük direnme değeri olarak tanımlanmaktadır.

Yüksek bir mekanik mukavemet betonlarda aranan en önemli özellik olmasına karşı betonun fiziksel ve kimyasal etkilere karşı da dayanıklı olması gerekmektedir. Mukavemet betonun diğer özelliklerini yaklaşık belirleyen bir parametre kabul edildiğinden, betonlar standartlarda basınç mukavemetleri baz alınarak sınıflandırılmaktadır (Yalçın ve Gürü 2006).

Yüksek basınç mukavemeti betonun diğer olumlu özelliklerinin de yüksek olduğunu göstermektedir. Basınç mukavemeti yüksek bir beton, sert, geçirimsiz, dış etkenlere karşı dayanıklı ve aşınmaya karşı dirençlidir. Bu yüzden betonların basınç dayanımları belirlenerek betonun kalitesi hakkında doğru değerlendirmeler yapmak mümkün olmaktadır. Bunun yanında basınç dayanımının tespit edilmesi için uygulanan deneyler nispeten basittir. Basınç dayanımı betonun en kolay tespit edilen özelliğidir (Baradan vd 2012).

### 2.6.2. Eğilme dayanımı

Yapıda beton elemanların üzerlerine gelen basınç ve/veya eğilme kuvvetleri betonun içerisinde dolaylı olarak çekme kuvvetlerinin oluşmasını neden olurlar. Çekme dayanımı basınç dayanımının %9-%10'u kadar olması sebebiyle tasarım aşamasında genelde betonun basınç dayanımı dikkate alınmaktadır.

Çekme dayanımı 'betonda çekme etkisi yaratacak zorlamaların sebep olacağı şekil değiştirmelere ve kırılmaya karşı betonun gösterebileceği direnme' olarak tanımlanmaktadır. Bu direncin düşük olması nedeniyle, çekme dayanımı değeri betondaki çatlakların oluşmasında rol oynamaktadır. Oluşabilecek çatlaklardan beton içerisine su ve asit, klor vb. zararlı maddeler rahatlıkla girebilmektedir. Bu durumda oluşabilecek çeşitli kimyasal olaylar betonda hasar meydana getirmektedir. Çatlaklardan sızan su ve çeşitli maddeler beton içerisindeki donatıyı da paslandırabilmektedir. Bu tür olumsuzluklar betonun dayanıklılığının azalmasına neden olur.

Betonun çekme dayanımı tespitinde birkaç farklı yöntem kullanılmaktadır. Kullanılan yöntemlerden biri de eğilme dayanım değerini kullanarak çekme dayanım değerinin bulunmasıdır. Genellikle kare kesitli kirişlerle yapılan eğilme deneyinde uygun şekilde hazırlanmış numunelere deney presinde eğilme yükü uygulanmaktadır. Üç nokta deney presi ve ya dört nokta deney presi ile yapılabilen deney sonucunda kırılma oluşturan eğilme yükü, gerekli formüllerde yazılarak eğilme dayanımları hesaplanmaktadır (Erdoğan 2007).

### 2.6.3. Su emme

Betonun, içerisindeki boşluklarına fiziksel olarak su çekmesine ‘su emme’ denmektedir. Betonun su emmesi, betonun kimyasal ve fiziksel etkenlere karşı dayanımını da etkilemektedir.

Betonda su emilimi, betonun gözenekliliği ve gözenek yapısı ile yakından ilgilidir. Gözenekliliğin fazla olması ve gözenekler arasında bulunan bağlantı su emilimini artırmaktadır. Su emme davranışı, betonun donma/çözülme ve zararlı maddelerden zarar görmesine karşı dayanma kapasitesini belirler. Su emilimi ile beton içerisine giren suyun, donduğunda hacmi artar. Artan bu hacim betonda gerilmelere neden olarak betonu çatlatmaktadır. Ayrıca su ile birlikte beton içerisine nüfuz eden zararlı maddeler betonun dayanım ve dayanıklılığını önemli ölçüde etkiler. Düşük su emme kapasitesi hem betonun mekanik özelliklerinde hem de dayanıklılığında iyi bir performans anlamına gelmektedir (Zhang and Panesar 2018).

### 2.6.4. Yüzey sertliği

Günümüzde yaygın olarak kullanılan deney yöntemlerinden biri de beton çekici(beton tabancası, schmidt çekici) deneyidir. Ernst Schmidt tarafından geliştirilen beton çekici betonların yüzey sertliğinin ölçümü ve bu sertliğe bağlı olarak betonların basınç dayanımlarının yaklaşık tahmininde kullanılmaktadır.

Schmidt çekici betonun basınç dayanımı ile yüzey sertliği arasındaki açık ilişkiye dayanarak betonun dayanımı hakkında bilgi verir (Panedpojoman 2018). Aygıttaki çelik bir kütle yay vasıtasıyla beton yüzeyine fırlatılır. Betona çarpan kütle geri sıçrar. Bu sıçrayış miktarı ne kadar büyükse betonun yüzey sertliği ve de dayanımı da o kadar büyüktür. Alet yüzey sertliğini ölçtüğünden yüzey sertliğini etkileyen faktörler (karbonatlaşma, yüzeyin suya doygunluğu vb.) sebebiyle yanıltıcı sonuçlar alınabilir. (Breccolotti *et al.* 2013) bu tip yöntemlerin yüzey pürüzlülüğüne, beton bileşimine, nem içeriğine ve karbonat derinliğine bağlı olmasından dolayı, bazı dezavantajlara sahip

olduğunu ve olumsuzlukların önüne geçmek için farklı test metodlarıyla beraber değerlendirilmesinin uygun olacağını ifade etmektedir.

Beton sertliği bölgesel olarak değişkenlik göstermektedir. Örneğin, okuma yapılan kısımda bulunan bir agrega tanesi yüksek bir verirken, boşluk kısımlara denk gelen okumalar düşük değerler vermektedir. Bu tip hataları minimize edebilmek adına ölçüm yapılacak bölgede birden fazla okuma yapılarak ortalamaları alınmalıdır. Çok yüksek ve çok düşük değerler varsa bunlar değerlendirme dışı bırakılmalıdır.

Beton çekici betonun dayanımını tespit etmede yeterli olmasa da, ünlformlulukların kontrol edilmesi, dayanım gelişimlerinin izlenmesi, betonun dayanımının tahmininde oldukça faydalı olmaktadır. Karot alma gibi daha güvenilir sonuçlar veren yöntemlere göre az maliyetli ve tahribatsız ölçümler yapabildiği schmidt çekici deneyini cazip hale getirmektedir.

#### **2.6.5. Ultrases geçiş hızı**

Betonun dayanımı ve diğer özellikleri arasında yaklaşık bir ilişki kurmak için ultrases geçiş hızı testiyle ölçümler yapılabilmektedir.

Ultrasonik test cihazı herhangi bir beton bloğun bir yüzeyine sesüstü dalgalar vermekte, beton numunesi içerisinde ilerleyen dalgalar betonun bir başka yüzeyinden geri alınmaktadır. Cihaz bu iki yüzey arasındaki mesafeyi, sesüstü dalgaların ne kadar sürede geçtiğini bulmaktadır.

Beton numunesi üzerinden geçen sesüstü dalgaların geçiş hızı ile beton dayanımı arasında doğrudan bir ilişki kurulamamaktadır. Ancak dalgaların geçiş hızı ile beton numunesinin yoğunluğu arasında belirli bir ilişki kurmak mümkün olmaktadır. Yoğunluğu az olan bir beton içerisinde daha çok boşluk bulunan beton anlamına gelmektedir. Sesüstü dalgalar içerisinde daha çok boşluk bulunan bir numuneden daha

uzun sürede geçmektedir. Yani betondaki boşluk oranı ile dalga hızı ters orantılıdır (Erdoğan 2007).

Yoğunluğu yüksek olan betonların basınç dayanımları da genellikle yüksektir. Su/çimento oranı yüksek ve ya iyi sıkıştırılmamış betonların yoğunluğu düşük olmakla beraber basınç dayanımları da düşüktür. Ultrases geçiş hızı deneyi ile betonların basınç dayanımları doğrudan tespit edilememesine rağmen birçok özelliği hakkında fikir edinilebilir. Bu ilişkiler sayesinde ultrases geçiş hızı ile betonun kalitesi arasında bir ilişki kurmak da mümkün olmaktadır. Yapılan çalışmalar neticesinde bulunan sesüstü dalga hızı ile beton kalitesi arasındaki ilişki Çizelge 2.5’de gösterilmektedir (Saint-Pierre 2016).

**Çizelge 2.5.** Ultrasonik test yöntemiyle beton kalitesinin değerlendirilmesi (Saint-Pierre 2016)

| <b>Dalga hızı (m/s)</b> | <b>Beton kalitesi</b> |
|-------------------------|-----------------------|
| >4500                   | Mükemmel              |
| 3500-4500               | İyi                   |
| 3000-3500               | Şüpheli               |
| 2000-3000               | Zayıf                 |
| <2000                   | Çok zayıf             |

### 3. MATERYAL ve YÖNTEM

#### 3.1. Materyal

##### 3.1.1. Portland çimentosu

Deneysel çalışmalarda CEM I 42.5 R tipi Portland çimentosu (PÇ) kullanılmıştır. TS EN 197-1'e uygun olarak üretildiği üreticisi AŞKALE Çimento Sanayi T.A.Ş tarafından beyan edilmiş olan çimentonun kimyasal, fiziksel özellikleri ve basınç değerleri Çizelge 3.1'de verilmektedir.

**Çizelge 3.1.** Çimentonun kimyasal içeriği, fiziksel özellikleri ve basınç dayanımı

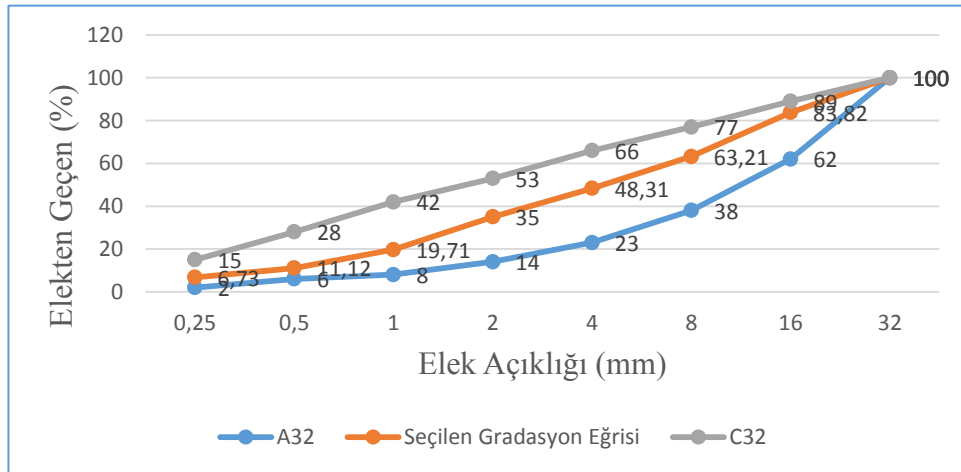
| Kimyasal<br>Kompozisyon        | Çimento<br>(%) ağırlıkça | Fiziksel özellikler                     | Değer |
|--------------------------------|--------------------------|-----------------------------------------|-------|
| SiO <sub>2</sub>               | 19,98                    | Özgül ağırlık, (g/cm <sup>3</sup> )     | 3,12  |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 4,96                     | Priz başlangıcı, (dk.)                  | 145   |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 3,13                     | Priz sonu, (dk.)                        | 201   |
| CaO                            | 61,94                    | Hacim genleşmesi, (mm)                  | -     |
| MgO                            | 2,65                     | Blaine özgül yüzey (cm <sup>2</sup> /g) | 3703  |
| SO <sub>3</sub>                | 3,01                     | <b>Basınç dayanımları</b>               |       |
| Na <sub>2</sub> O              | 0,58                     | 2 gün. basınç dayanımı,<br>(MPa)        | 27,1  |
| K <sub>2</sub> O               | 0,75                     | 28 gün. basınç dayanımı,<br>(MPa)       | 54,7  |
| Kızdırma kaybı                 | 2,36                     |                                         |       |
| Çözünmeyen Kalıntı             | 0,95                     |                                         |       |

### 3.1.2. Agregalar

Bu çalışmada, Artvin ili Borçka ilçesinde faaliyet gösteren bir taşocağının doğal kum ve çakıl malzemesi agregalar olarak kullanılmıştır. Kullanılan agregalar kırma malzeme olup maksimum agregalar tane çapı 25 mm'dir. Karışımlarda kullanılacak her bir grup agregalar için sınır eğrileri arasında kalacak şekilde yüzdeleri ayarlanmıştır. Elek analizi sonuçları Çizelge 3.2'de, sınır granülometri eğrileri ve karışımda kullanılan agregaların granülometri eğrisi ise Şekil 3.1'de verilmiştir.

**Çizelge 3.2.** Beton bileşiminde kullanılan agregalar için elek analizi sonuçları

| Elek çapı | Kalan % | Geçen % |
|-----------|---------|---------|
| 32        | 0       | 100     |
| 16        | 16,18   | 83,82   |
| 8         | 36,79   | 63,21   |
| 4         | 51,69   | 48,31   |
| 2         | 65,00   | 35,00   |
| 1         | 80,29   | 19,71   |
| 0,50      | 88,88   | 11,12   |
| 0,25      | 93,27   | 6,73    |
| Tava      | 100     | 0       |



**Şekil 3.1.** Beton bileşiminde kullanılan agregalar için granülometri eğrisi

Yıkanmamış kum (0-5 mm), yıkanmış kum (0-5 mm) , ince agrega (5-12 mm) ve iri agrega (12-25 mm) olarak ayrılan agregalara uygulanan deneyler ve sonuçları Çizelge 3.3’de verilmiştir.

**Çizelge 3.3.** Beton karışımlarında kullanılan agregaların fiziksel özellikleri

| Fiziksel Özellikler ve Deney Standardı                    | Agrega Grubu   | Değerler |
|-----------------------------------------------------------|----------------|----------|
| Yoğunluk (kg/dm <sup>3</sup> ) -<br>ASTM C127, ASTM C 128 | 12-25 mm       | 2,73     |
|                                                           | 5-12 mm        | 2,71     |
|                                                           | Yıkanmış Kum   | 2,70     |
|                                                           | Yıkanmamış Kum | 2,68     |
| Su Emme (%) -<br>ASTM C127, ASTM C 128                    | 12-25 mm       | 1,5      |
|                                                           | 5-12 mm        | 1,9      |
|                                                           | Yıkanmış Kum   | 2,1      |
|                                                           | Yıkanmamış Kum | 2,6      |
| 200 No’lu Elekten Geçen Miktar (%) -<br>ASTM C 117        | 12-25 mm       | 1,0      |
|                                                           | 5-12 mm        | 1,2      |
|                                                           | Yıkanmış Kum   | 3,3      |
|                                                           | Yıkanmamış Kum | 12,8     |
| Metilen Mavisi - TS EN 933-9                              | Yıkanmamış Kum | 1,5      |
| Los Angeles Aşınma Kaybı,<br>500 Devir (%) - ASTM C 131   | İri Agregası   | 25,5     |

Elde edilen agrega deney sonuçlarına göre kullanılan agregaların standartlara uygun olarak beton karışımlarda kullanılabileceği görülmüştür.

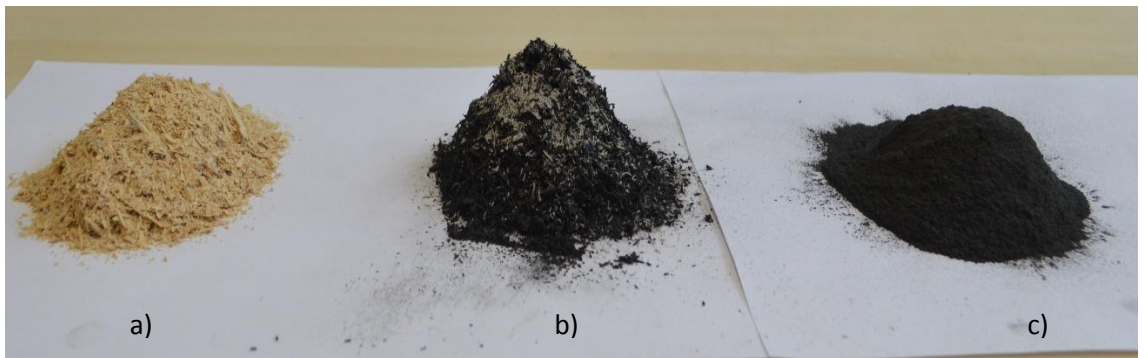
### 3.1.3. Pirinç kabuğu külü

Bu çalışma kapsamında Artvin ili Yusufeli ilçesinin pirinç tarımı yapılan bölgesinden alınan pirinç kabukları kullanılmıştır. Pirinç kabukları zaman ayarlı bir fırında 600°C sıcaklıkta 3 saat yüksek sıcaklığa maruz bırakılarak (yakma) elde edilmiştir. Yakma işleminin sonunda fırın kapatılarak küller kendi halinde soğumaya bırakılmıştır. Oda

sıcaklığına kadar soğuyan küller öğütücü bir makinede öğütülmüş ve uygun şekilde elenmiştir. Çalışmada pirinç kabuğu külleri çimentonun ağırlıkça %5, %10 ve %15'i miktarlarında çimento ile yerdeğiştirilerek karışımlara katılmıştır. Pirinç kabuklarının yakılması için kullanılan fırın Şekil 3.2'de, kabukların yakılmadan önce ve sonraki ile öğütüldükten sonraki halleri de Şekil 3.3'de verilmiştir.



**Şekil 3.2.** Pirinç kabuğu yakma işlemi için kullanılan fırın



**Şekil 3.3.** (a) Pirinç kabuğu (b) Isıl işlem görmüş pirinç kabuğu (c) Öğütülmüş ve elenmiş pirinç kabuğu

Çalışma kapsamında kullanılacak küllerin fiziksel ve kimyasal özellikleri Çizelge 3.4'te verilmiştir.

**Çizelge 3.4.** Pirinç kabuğu külüne ait kimyasal ve fiziksel özellikler

| <b>Kimyasal<br/>Kompozisyon</b>   | <b>Çimento<br/>(%) ağırlıkça</b> | <b>Standart</b>                                                                                              |
|-----------------------------------|----------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| SiO <sub>2</sub>                  | 53,53                            | SiO <sub>2</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> : Min %50<br>(ASTM C 618) |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>    | 0,64                             |                                                                                                              |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>    | 0,28                             |                                                                                                              |
| CaO                               | 0,70                             | Max %2,5 (TS EN 450-1)                                                                                       |
| MgO                               | 1,52                             | Max %4 (TS EN 450-1)                                                                                         |
| SO <sub>3</sub>                   | 0,13                             | Max %3 (TS EN 450-1)                                                                                         |
| Na <sub>2</sub> O                 | 0,09                             |                                                                                                              |
| K <sub>2</sub> O                  | 4,01                             |                                                                                                              |
| Kızdırma kaybı                    | 34,3                             | Max %9 (TS EN 450-1)                                                                                         |
| <b>Fiziksel Özellikler</b>        |                                  |                                                                                                              |
| Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )     | 1,99                             |                                                                                                              |
| Özgül yüzey- (cm <sup>2</sup> /g) | 912589                           |                                                                                                              |

Isıl işlem sonucunda bileşimde bulunan yanmamış karbonlar sebebiyle kızdırma kaybı değerleri yüksek çıkabilmekte ve silisyum bileşen miktarı düşük değerlerde kalabilmektedir (De souza *et al.* 2011; Abalaka 2012). Düşük silisyum bileşen miktarına sahip küllerin kullanıldığı çalışmalarda da olumlu sonuçlar elde edilebilmiştir (Alex *et al.* 2016).

Isıl işlem sonucu pirinç kabuklarının uygun şekilde öğütülmesi gerekmektedir. Literatürde farklı partikül boyutlarında küller kullanılarak yapılan bir çok çalışma mevcuttur. Genel kanı pirinç kabuğu külünün inceliğinin artmasının reaktivitesini artırdığı yönündedir. Ancak Mehta pirinç kabuğu küllerinin puzolanik aktivitesini esasen partiküllerin iç yüzey alanından kazandığını belirtmiş ve bu sebeple de küllerin yüksek inceliğinden kaçınılması gerektiğini göstermiştir (Ferraro and Nanni 2012). Çalışma kapsamında öğütülen pirinç kabuğu külüne ait partikül boyutu dağılımı Çizelge 3.5'te verilmiştir.

**Çizelge 3.5.** Pirinç kabuğu külüne ait partikül boyutu

| Boyut                       | Değer     |
|-----------------------------|-----------|
| 90 mikrometre elek altı (%) | $\geq 75$ |
| 45 mikrometre elek altı (%) | $\geq 40$ |

**3.1.4. Karışım ve kür suyu**

Karışımların hazırlanmasında kullanılan karışım su, betona zararlı olabilecek organik madde ihtiva etmeyen ve sıcaklığı yaklaşık  $20\pm 5^{\circ}\text{C}$  sıcaklığındaki şehir şebeke suyu kullanılmıştır. Beton karma ve kür suyunun kimyasal analiz sonuçları Çizelge 3.6’de verilmiştir (Anonim 2017b).

**Çizelge 3.6.** Beton karma ve kür suyuna ait analiz sonuçları

| Analizler          | Deney Sonuçları | Limit Değerler           |
|--------------------|-----------------|--------------------------|
| Koku               | Yok             | Yok                      |
| Amonyum (mg/L)     | 0,02            |                          |
| İletkenlik (mS/cm) | < 2500          | 0-2500 (TS 9748 EN27888) |
| pH                 | 7,93            |                          |

**3.1.5. Kimyasal katkı**

Beton örneklerinin üretimi aşamasında karışımlarda organik polimer esaslı Grace Zyla 645 kimyasal katkı kullanılmıştır. Kimyasal katkıya ait analiz verileri Çizelge 3.7’de gösterilmiştir.

**Çizelge 3.7.** Kimyasal katkıya ait teknik özellikler

| <b>Analizler</b>             | <b>Grace Zyla 645</b> |
|------------------------------|-----------------------|
| Görünüm                      | Şeffaf                |
| Özgül ağırlık (kg/l)         | 1,090-1,115           |
| PH                           | 6-9                   |
| Alkali içeriği (%)           | ≤ 10                  |
| Klor iyon içeriği (%)        | ≤ 0,1                 |
| Dozaj kullanım limitleri (%) | 0,8-1,5               |

### 3.1.6. Diğer malzemeler

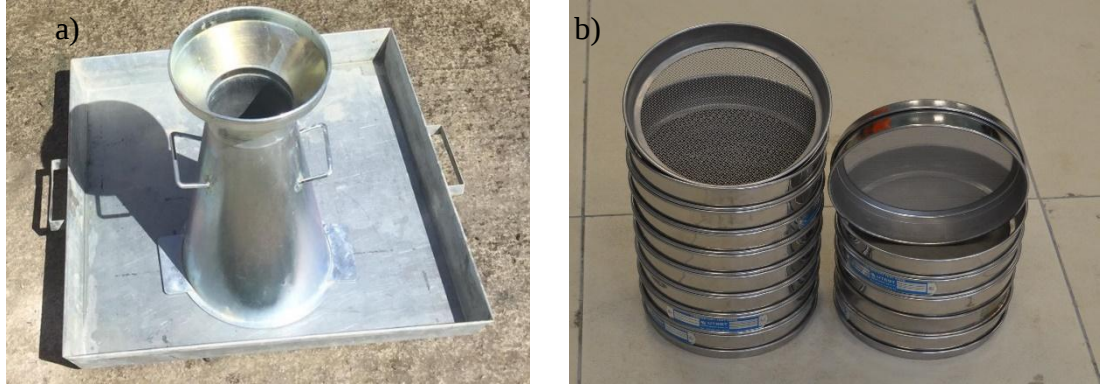
Hazırlanan beton örneklerinin kalıplardan kolayca ayrılmasını sağlayabilmek için kalıplarda piyasada satılan kalıp yağı kullanılmıştır.

### 3.1.7. Deneylerde kullanılan aletler

Bu kısımda deney çalışmaları sırasında kullanılan deney aletlerinin özellikleri verilmiştir. Aletler hakkında kısa tanımlar verilmiş ve anlatım resimlerle desteklenmiştir.

#### 3.1.6.a. Elekler ve çökme hunisi

Deneylerde TS ISO 3310-2'ye uygun toplama kabı ve göz açıklığı 0,25 mm, 0,5 mm, 1 mm, 2 mm, 4 mm, 8 mm, 16 mm ve 32 mm olan kare delikli tel elekler kullanılmıştır. Betonların kıvam tayininde kullanılan çökme hunisi, alt çapı 200 mm, üst çapı 100 mm ve yüksekliği 300 mm olan metalden yapılmış kesik koni şeklindedir.



**Şekil 3.4.** (a) Çökme hunisi (b) Elekler

### 3.1.6.b. Betonyer

Bu çalışmada hazırlanacak betonların karılması işleminde  $30 \text{ dm}^3$  kapasiteli, 25 devir/dakika dönüş hızına sahip laboratuvar ortamında çalışmaya uygun betonyer kullanılmıştır. Kullanılan betonyer Şekil 3.5 (a)'da gösterilmiştir.

### 3.1.6.c. Kalıplar

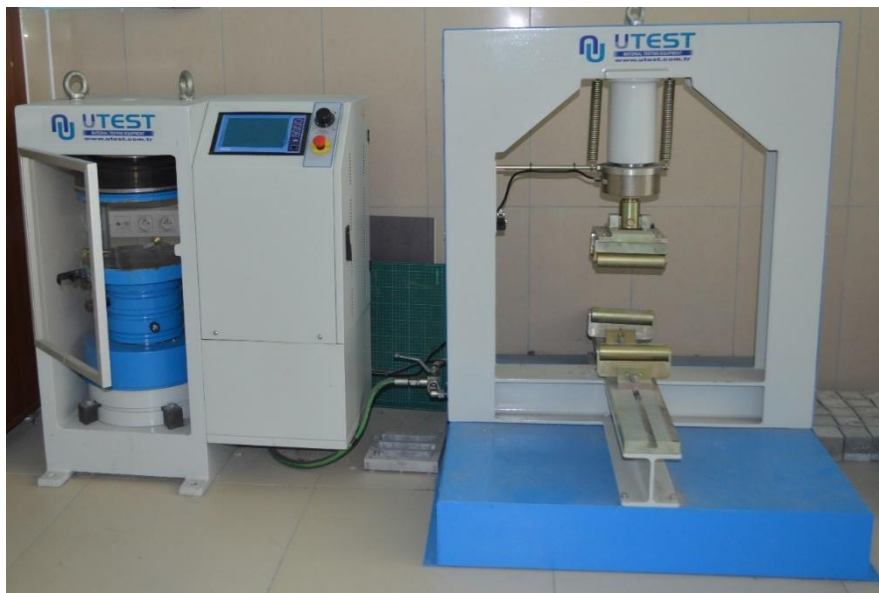
Küp numuneler için  $150 \times 150 \times 150 \text{ mm}$  boyutunda sertleştirilmiş plastikten imal edilmiş kalıplar kullanılmıştır. Eğilme dayanımı tayini için kullanılacak kiriş numuneleri için de  $10 \times 10 \times 400 \text{ mm}$  boyutlu prizmatik çelik kalıplar kullanılmıştır (TS EN 12390-1). Kullanılan kalıplar Şekil 3.5 (b)'de gösterilmiştir.



**Şekil 3.5.** (a) Betonyer (b) Kalıplar

#### 3.1.6.d. Pres

Sertleşmiş beton örnekleri üzerinde yapılan basınç dayanımı tayini için UTEST firması tarafından üretilen UTC-4231 model ve 200 ton kapasiteli hidrolik pres kullanılmıştır. Kiriş numunelerinin eğilme dayanımlarının belirlenmesi için de aynı cihazın eğilme presinden faydalanılmıştır.



**Şekil 3.6.** Sertleşmiş beton deneylerinde kullanılan basınç ve eğilme presi

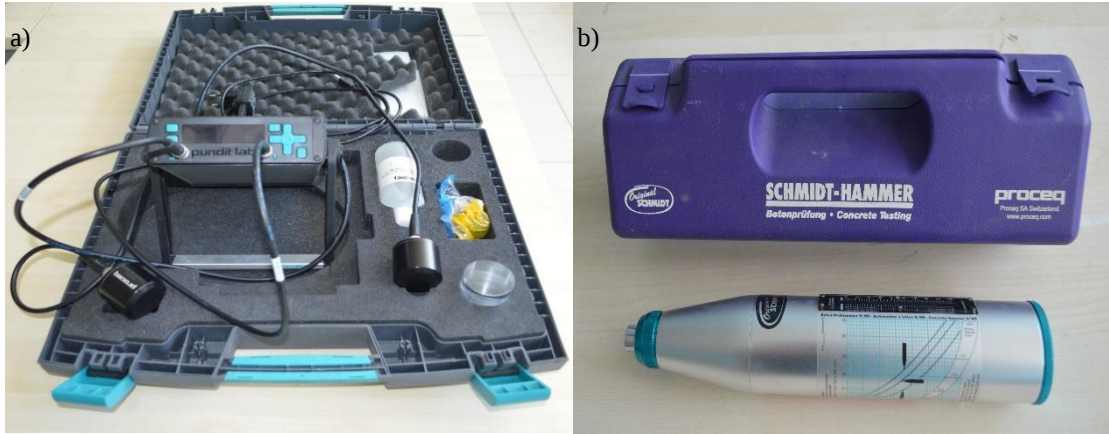
### 3.1.6.e. Ultrases hızı ölçüm cihazı

Ultrasonik test cihazı herhangi bir beton bloğun bir yüzeyine sesüstü dalgalar vermekte, betonun bir başka yüzeyinden bu dalgaları geri almaktadır. Cihaz bu iki yüzey arasındaki mesafeyi, sesüstü dalgaların ne kadar sürede geçtiğini bulmaktadır. Ultrasonik cihaz ile ölçülen bu hız ile betonların mukavemeti, homojenliği, elastisite modülü, döküm özellikleri ve çatlakların varlığı gibi özellikler arasında anlamlı ilişkiler kurmak mümkün olmaktadır.

Çalışma kapsamında ultrasonik hız ölçümleri Şekil 3.7 (a)'da gösterilen dijital ultrasonik hız ölçme aleti ile yapılmıştır.

### 3.1.6.f. Schmidt çekici

Schmidt çekici (beton çekici) betonların yüzey sertliklerine bağlı olarak basınç dayanımlarının yaklaşık tahmininde kullanılmakta olup, çalışma kapsamında kullanılan beton çekici Şekil 3.7 (b)'de görülmektedir.



Şekil 3.7. (a) Ultrases cihazı (b) Schmidt test çekici

### 3.1.6.g. Su kürü uygulamasında kullanılan su tankı

Üretilen betonların çeşitli özelliklerinin belirlenmesi için numuneler TS 1247 “Beton Yapım, Döküm ve Bakım Kuralları” standardına göre 7, 28, 90 gün boyunca su kürüne tabi tutulmuştur. Su kürü için kullanılan kür tankı Şekil 3.8’de verilmiştir.



Şekil 3.8. Kür tankı

## 3.2. Yöntem

### 3.2.1. Agregada deneylerinde uygulanan yöntemler

Çalışma kapsamında yapılacak agregada deneyleri için numune alma işlemi TS 706 EN 12620+A1’de belirtilen dörde bölerek küçültme (çeyrekleme) yöntemi uygulanarak yapılmıştır. Tüm agregayı ifade etmesi açısından yığının bir çok yerinden alınan örnekler, düz bir zeminde bir daire şeklinde serilmiştir. Daha sonra bu yığın dört eş parçaya bölünmüş, karşılıklı iki parça atılıp kalan parçalar gerekli miktar kalıncaya kadar bu metodla azaltılmaya devam edilmiştir.

### **3.2.1.a. Agregaların tane büyüklüğü dağılımı**

Elek analizi, TS EN933-1 (2012) standardına uygun olarak belirlenmiştir. Deneyde kullanılan elek takımı standartlara uygun toplama kabı, kare delikli elekler, tava ve kapaktan oluşmaktadır.

Elekler, göz açıklıkları yukarıdan aşağıya düzenli azalacak şekilde birbirlerine geçirilerek sıralanmıştır. Yıkanmış ve kututulmuş malzeme elek takımına dökülmüş ve elekler makine ile sarsılmıştır.

Eleme işlemi, standarda göre ilgili elek üzerinde kalan malzemenin kütlesinde 1 dakika boyunca %1'den daha fazla değişiklik olmayana kadar devam eder. Yeterli süre boyunca eleme işlemi yapılmış ve elek üzerinde kalan agregalar tartılarak kaydedilmiştir. Tüm elekler için aynı işlemler tekrarlanmış son olarak da tavada kalan malzemede tartılarak kaydedilmiştir.

### **3.2.1.b. Agregada deneyleri**

Çalışma kapsamında ASTM C127 ASTM C128 standartlarına göre agregaların yoğunluk ve su emme değerleri, ASTM C 117'ye göre 200 No'lu Elekten Geçen Miktar (%)'si, ASTM C 131'e göre Los Angeles aşınma kayıpları bulunmuş ve TS EN 933-9'a göre Metilen Mavisi deneyi yapılmıştır.

### **3.2.2. Karışım seçeneklerinin belirlenmesi**

Çalışmada pirinç kabuğu külünün çimento ile kısmı yer değiştirmesi yoluyla bağlayıcılık özelliklerini inceleme amacıyla karışım hesabı yapılmıştır.

Karışım hesabı, beton plastik kıvamdayken ve sertleştikten sonra kendinden beklenen tüm özellikleri gösterebilmesi için gerekli agrega, çimento, su ve gerektiğinde katkı maddesi miktarlarının belirlenmesi için yapılır.

Bu çalışmada pirinç kabuğu külünün belli oranlarda çimento ile yer değiştirdiği karışımlar hazırlanmıştır. Çimento olarak CEM-I 42,5 kullanılmış, metreküpte 320 kg olacak şekilde hesaplanmıştır. Pirinç kabuğu külleri çimento ağırlığının %5, %10 ve %15'i oranında kullanılmıştır.

Yapılacak deneyler için 150 x 150 x 150 boyutlarında küp numuneler ve 100 x 100 x 400 boyutlarında kiriş numuneler hazırlanmıştır. Kiriş numuneler üzerinde 28 gün sonunda; küp numuneler üzerinde ise 7, 28 ve 90 günler sonunda deneyler yapılmıştır.



**Şekil 3.9.** Küp ve kiriş numuneler

### 3.2.3. Üretilen beton serilerinin kodlanması

Üretilen betonlar içerisinde bulunan pirinç kabuğu kül oranına göre kodlanmıştır. Pirinç kabuğu PK ile kodlanmıştır.

PK0 = Kül içermeyen kontrol numunesi

PK5 = %5 oranında pirinç kabuğu külü ikame edilmiş beton numunesi

PK10 = %10 oranında pirinç kabuğu külü ikame edilmiş beton numunesi

PK15 = %15 oranında pirinç kabuğu külü ikame edilmiş beton numunesi

### 3.2.4. Karışım hesabı

Karışımlarda kullanılacak malzeme miktarları TS 802 standardında verilen yöntemlere göre hesaplanmıştır. Karışım oranları hazırlanırken maksimum agrega çapı 32 mm ve S/Ç oranı (0.53) sabit alınmıştır. Karışımda çimentoya %5, 10, 15 oranlarında yer değiştirecek küllerin de gösterildiği karışım oranları Çizelge 3.8’de verilmektedir.

**Çizelge 3.8.** Beton karışım oranları

| Karışım Türü | Çimento (kg) | PK Külü (kg) | Agrega (kg) (0-4 mm) | Agrega (kg) (5-25 mm) | Su (kg) | Kimyasal katkı (gr) |
|--------------|--------------|--------------|----------------------|-----------------------|---------|---------------------|
| PK0          | 320          | -            | 860                  | 938                   | 169     | 3200                |
| PK5          | 304          | 16           | 860                  | 938                   | 169     | 3200                |
| PK10         | 288          | 32           | 860                  | 938                   | 169     | 3200                |
| PK15         | 272          | 48           | 860                  | 938                   | 169     | 3200                |

Çalışma esnasında oluşması muhtemel kayıplar gözönünde bulundurularak karışım hesapları sonucunda bulunan miktarlar yaklaşık %10 artılarak malzemeler hazırlanmıştır.

### 3.2.5. Taze beton deneylerinde uygulanan yöntemler

Üretilen betonlardan TS EN12350-1’de belirtilen metotlar uygulanarak alınan örnekler üzerinde taze beton deneyleri yapılmıştır. Yapılan deneyler TS EN 12350-2 standardına göre çökme deneyi ve TS EN 12350-6 standardına göre beton birim ağırlık deneyidir.

Taze beton deneylerinde ilk olarak kıvam deneyi yapılmıştır. Deneyde TS EN 12350–2 belirtilen yöntemler ve standart çökme konisi kullanılmıştır. Deney öncesinde çökme

konisinin iç yüzeyi nemlendirilmiş ve koni nemli, düz bir zemin üzerine yerleştirilmiştir.

#### A- Çökme deneyi

Taze beton koni içerisine üç tabaka halinde doldurulmuştur. Tabakalar 12 mm çapında 60 cm uzunluğundaki şişleme çubuğu ile 25'er kez şişlenerek yerleştirilmiştir. İçi dolu koninin üst tarafındaki bozuk kısımlar düzeltilmiş daha sonra koni yukarı çekilerek beton örneği serbest bırakılmıştır. Çıkarılan koni beton örneğinin yanına ters çevrilerek konmuştur. Koninin üst seviyesi ile beton yığının üst seviyesi arasındaki fark (çökme değeri), şişleme çubuğu ve metre yardımıyla tespit edilmiştir (TS EN 12350-2).



**Şekil 3.10.** Taze betonda çökme deneyi

#### B- Birim ağırlık

Taze betonlar içine konuldukları kalıplar ile birlikte tartılarak birim hacim ağırlıkları (B.H.A) hesaplanmıştır. Kalıpların ağırlıkları belirlenmiş, tartımdan sonra toplam ağırlıktan çıkarılarak beton ağırlığı bulunmuştur. Beton ağırlığı hacme bölünerek de birim hacim ağırlığı hesaplanmıştır.

$$B.H.A = \frac{m_{toplam} - m_{kalıp}}{v_{kalıp}}$$

$m_{\text{toplam}} = \text{Kalıp} + \text{Numune ağırlığı}$

$m_{\text{kalıp}} = \text{Kalıp ağırlığı}$

$v_{\text{kalıp}} = \text{Kalıp hacmi olarak alınmıştır.}$

### **C- Numune hazırlama**

Numune hazırlama ve kür işlemleri TS EN 12390-2 standartına uygun olacak şekilde yapılmıştır. Hazırlanan betonlar üzerinde yapılan çökme ve birim ağırlık deneylerinden sonra daha önceden hazırlanmış 150 x 150 x 150 mm küp ve 100 x 100 x 400 mm ebatlarındaki çelik prizmatik kiriş kalıplarına yerleştirilmiştir. Küp ve kiriş numuneler doldurulduktan sonra yüzeyleri düzeltilmiştir. Su kürü için numuneler 24 saat kalıplarda bekletilmiştir.

Kalıplarda 24 saat bekletilen numuneler daha sonra kalıplardan çıkarılarak, standartlara uygun şekilde su ihtiva eden kür havuzuna konulmuştur. Numuneler su içerisinde deney yapılacakları günün bir önceki gününe kadar bekletilmiştir. Sertleşmiş beton deneylerinden bir gün önce kalıplardan çıkartılan numuneler deneylere hazır hale getirilmiştir.

#### **3.2.6. Sertleşmiş beton deneyleri**

Çalışmada kapsamında üretilen betonlar 7, 28 ve 90 gün su küründe bekletilmiştir. Kür sürecini tamamlayan numuneler üzerinde basınç dayanımı, birim ağırlık, eğilme dayanımı, ultrases geçiş hızı ve beton çekici gibi deneyler yapılmıştır. Her yaş ve 4 seri için toplam 36 adet küp numune, 28 gün ve 4 seri için ise 12 adet kiriş numune üzerinde deneyler yapılmıştır.

### 3.2.6.a. Birim ağırlık deneyi

Numuneler 28 günlük su kürünün ardından havuzdan çıkarılarak kurumaya bırakılmıştır. Kuru numuneler tartılmış, bulunan değerler numune hacimlerine bölünerek birim hacim ağırlıkları hesaplanmıştır (TS EN 12390-7).

### 3.2.6.b. Ultrases hızı deneyi

Ultrases hızı deneyi beton örneğinin bir yüzüne gönderilen ultrasonik dalgaların bir başka yüzeyden geri alınma süresini ölçen bir deneydir. Dalgaların geri alınma süresinin artması beton örneğinin boşluklu bir yapıya sahip olduğunu gösterir.

Ultrases hızı deneyi TS EN 12504-4 (2012) standardına uygun olacak şekilde küp numuneler üzerinde yapılmıştır. Cihazın dalga gönderen ve alan başlıkları beton numunenin karşılıklı iki yüzeyine tutularak okuma yapılmıştır. Değerlerin daha sağlıklı olması adına beton yüzeyleri temizlenmiş ve okuma yapılacak yüzey ile cihaz başlıkları arasına ultrases jeli sıkılmıştır. Her bir küpten iki okuma yapılarak hata payı azaltılmış değerlerin ortalaması alınarak kaydedilmiştir.



**Şekil 3.11.** Ultrases deneyi

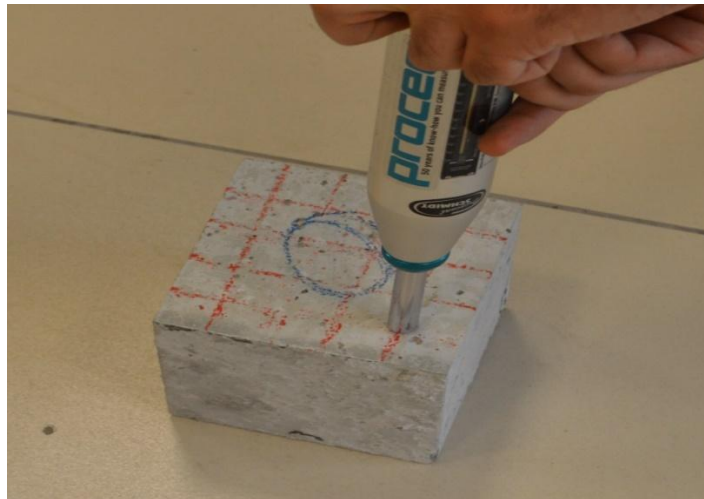
### 3.2.6.c. Su emme deneyi

ASTM C642 standardına uygun olarak %5, %10 ve %15 pirinç kabuğu külü ikameli örneklerin 7, 28 ve 90 günlük su emme yüzdeleri belirlenmiştir. Deneyler için 150×150×150 mm'lik kübik beton örnekleri kullanılmıştır. Su emme deneyinde numuneler deney gününe kadar kür havuzunda bekletildikten sonra sudan çıkartılarak, yüzeyi havlu ile kurutulmuş ve tartılmıştır (B). Daha sonra 24 saat etüvde 110±5 °C bekletilen örnekler 20 °C-25 °C'ye gelince tartılmıştır (A). Beton örneklerinin su emme yüzdesini veren denklem aşağıdaki şekildedir.

$$\text{Su emme Yüzdesi: } [(B-A)/A] \times 100$$

### 3.2.6.d. Schmidt test çekici

Schmidt test çekici ile yapılan deney tahribatsız muayene yöntemlerindendir. Basit ve düşük maliyetli bir yöntem olduğundan yaygın olarak kullanılmakta olan deney çalışma kapsamında küp numuneler üzerinde uygulanmıştır. Schmidt test çekici deneyi TS EN 12504-2 (2013) standardına uygun olarak yapılmıştır. Yapılacak okumalarda hata payını azaltmak için örnekler üzerinde karelej oluşturacak şekilde işaretleme yapılarak okumalar yapılmıştır. Okunan değerlerin ortalamaları alınmıştır.



### Şekil 3.12. Schmidt deneyi

#### 3.2.6.e. Eğilme dayanımı

Hazırlanan prizma numuneler üzerinde dört noktalı eğilme dayanımı deneyi yapılmıştır. Kür havuzundan çıkarılan numuneler laboratuvar ortamında kurumaya bırakıldı. Daha sonra eğilme presine tam merkezlenerek yerleştirildi. Kirişler kırılıncaya kadar sabit gerilme artışı olacak şekilde makine ayarlandı. Eğilme dayanımlarının hesabında TS EN12390-5'deki yöntemler uygulanmış ve eğilme dayanımı aşağıdaki bağıntı yardımıyla hesaplanmıştır.

$$\sigma_e = \frac{P \times L}{b \times d^2}$$

Burada;

$\sigma_e$  : Eğilme dayanımı, MPa (N/mm<sup>2</sup>)

P : En büyük yük, N

L : Mesnet silindirleri arasındaki açıklık, mm

b, d : Numunenin en kesit boyutları, mm'ye karşılık gelmektedir.



**Şekil 3.13.** Eğilme dayanımı deneyi

#### **3.2.6.f. Basınç dayanımı**

Basınç dayanımı TS EN12390-3'deki yöntemler göz önüne alınarak tespit edilmiştir. 7, 28 ve 90 gün sonlarında küp numuneler üzerinde yapılan basınç dayanımı tayini 2000 kN'luk basınç presinde yapılmıştır. Basınç test cihazının yükleme hızı tüm numuneler için 1 MPa/sn olarak ayarlanmıştır.



**Şekil 3.14.** Basınç dayanımı deneyi



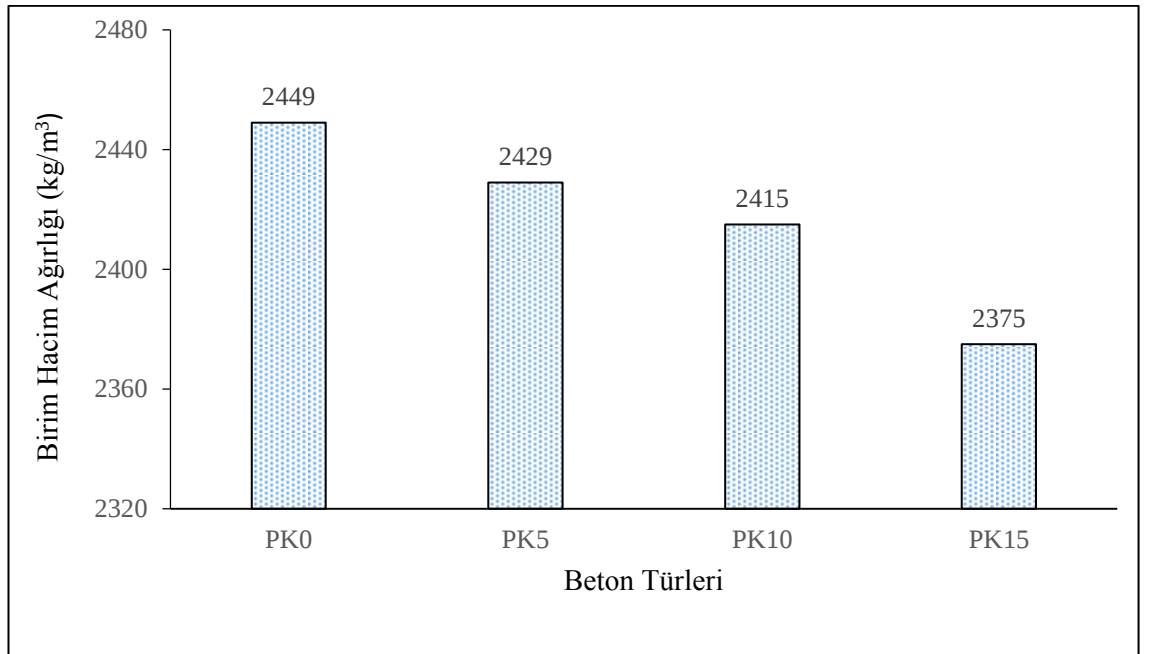
#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Bu bölümde, üretilen beton numunelerine ait taze ve sertleşmiş beton deneylerinin sonuçları verilmiş ve elde edilen sonuçlar çizelgeler ve grafikler yardımıyla yorumlanmıştır.

##### 4.1. Taze Beton Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

###### 4.1.1. Birim ağırlık

Birim ağırlık deney sonuçlarına göre beton içerisine katılan pirinç kabuğu kül miktarı arttıkça taze betonun birim ağırlığının düştüğü görülmüştür. Ölçümler neticesinde; ortalama birim ağırlıklar taze betonda PK0, PK5, PK10, PK15 numune gruplarında ortalama sırasıyla 2449, 2429, 2415, 2375 kg/m<sup>3</sup> olarak belirlenmiştir.



**Şekil 4.1.** Taze betonun birim hacim ağırlığının beton türleri ile değişimi

Beton içerisine çimento ağırlığının %5, 10 ve 15 oranlarında pirinç kabuğu külü ilavesi ile taze betonun birim ağırlığında sırasıyla %0.82, 1.39 ve 3.02 oranında azalmalar meydana gelmiştir.

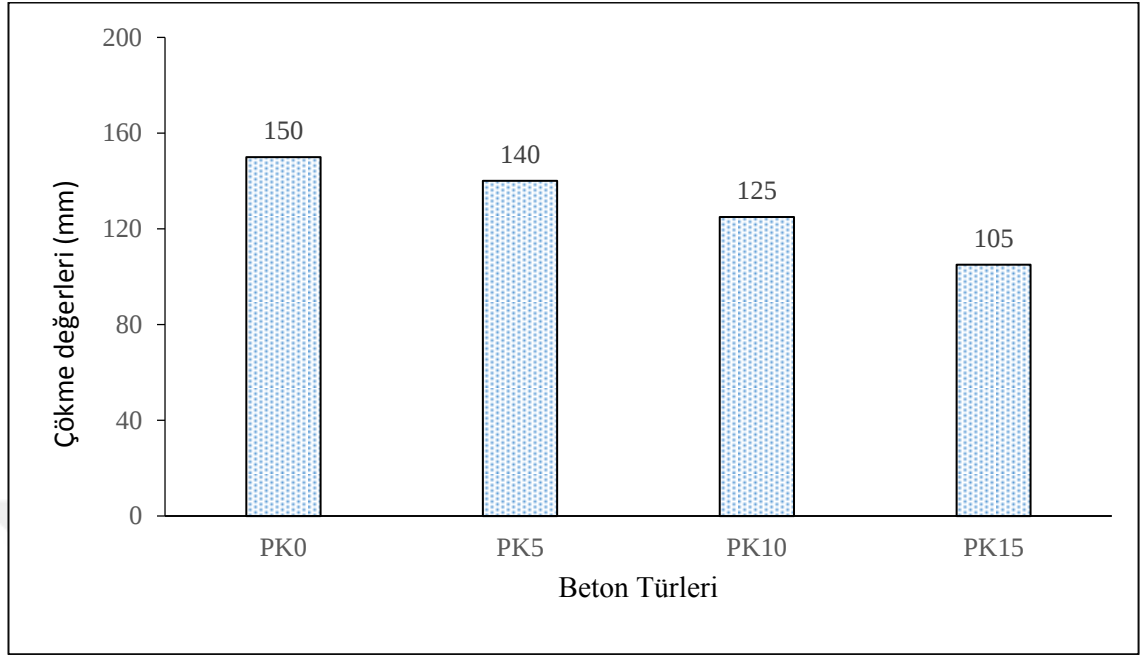
**Çizelge 4.1.** Taze betonda birim ağırlık değerleri

| Karışım Türü  | Birim Hacim Ağırlık<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | Kontrol Numuneye Göre<br>Değişim (%) |
|---------------|---------------------------------------------|--------------------------------------|
| PK0 (Kontrol) | 2449                                        | -                                    |
| PK5           | 2429                                        | -0,82                                |
| PK10          | 2415                                        | -1,39                                |
| PK15          | 2375                                        | -3,02                                |

Pirinç kabuğu küllerinin birim ağırlığının çimento birim ağırlığından düşük olmasından dolayı, karışımdaki kül miktarı arttıkça taze ve sertleşmiş betonun birim ağırlığında azalma gözlenmiştir. Hamzeh *et al.* (2013) yaptıkları çalışmada pirinç kabuğu kül miktarı arttıkça numunelerin birim ağırlığının düştüğünü göstermişlerdir.

#### 4.1.2. İşlenebilirlik

Pirinç kabuğu külü ikameli taze betonların işlenebilme özelliğindeki değişimi belirlemek amacıyla çökme deneyi yapılmıştır. Çökme deneyine ait sonuçlar Şekil 4.2 ve Çizelge 4.2’de gösterilmiştir.



**Şekil 4.2.** Taze betonun çökme değerinin beton türleri ile değişimi

Karışımlardaki kül miktarı arttıkça çökme değerinde azalma gözlenmiştir. Referans örneklere göre çökme miktarlarında PK5, PK10 ve PK15 karışım örneklerinde sırasıyla %6,67, 16,67 ve %30 azalmalar gözlenmiştir. Çökme miktarındaki azalma küllerin yüksek yüzey alanına sahip olmaları sebebiyle su emme kapasitelerinin yüksek olmasından ileri gelmektedir (Salas *et al.* 2009).

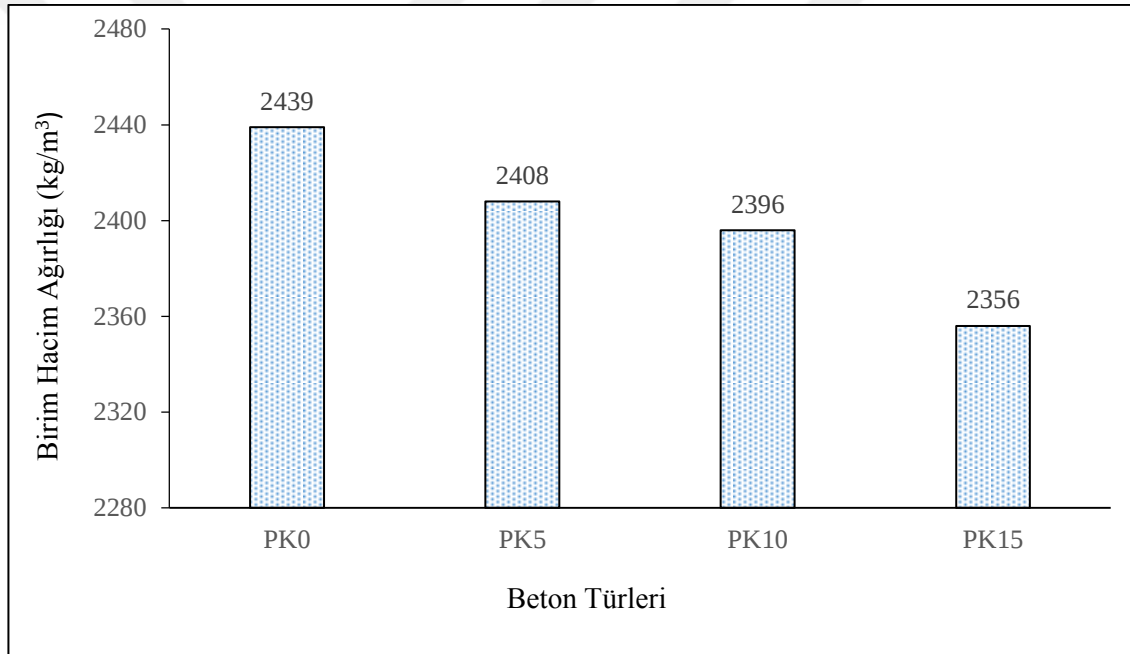
**Çizelge 4.2.** Taze betonda çökme miktarı değerleri

| Karışım Türü  | Çökme Değerleri (mm) | Kontrol Numuneye Göre Değişim (%) |
|---------------|----------------------|-----------------------------------|
| PK0 (Kontrol) | 150                  | -                                 |
| PK5           | 140                  | -6,67                             |
| PK10          | 125                  | -16,67                            |
| PK15          | 105                  | -30,00                            |

## 4.2. Sertleşmiş Beton Deney Sonuçlarının Belirlenmesi

### 4.2.1. Birim ağırlık

Numuneler üzerinde 28 gün sonunda yapılan birim ağırlık deney sonuçları Şekil 4.3 ve Çizelge 4.3’de verilmiştir. Ölçümler neticesinde ortalama birim ağırlıklar sertleşmiş betonda PK0, PK5, PK10 ve PK15 numune gruplarında ortalama sırasıyla 2439, 2408, 2396, 2356  $\text{kg/m}^3$  olarak belirlenmiştir.



**Şekil 4.3.** Sertleşmiş beton birim hacim ağırlığının beton türleri ile değişimi

Betonda kül oranı arttıkça betonun birim ağırlığında da taze betonunkine benzer şekilde bir azalma görülmüştür. PK5, PK10, PK15 numune gruplarında kontrol numunesine göre sırasıyla %1,27, %1,76 ve %3,40 oranında azalmalar meydana gelmiştir.

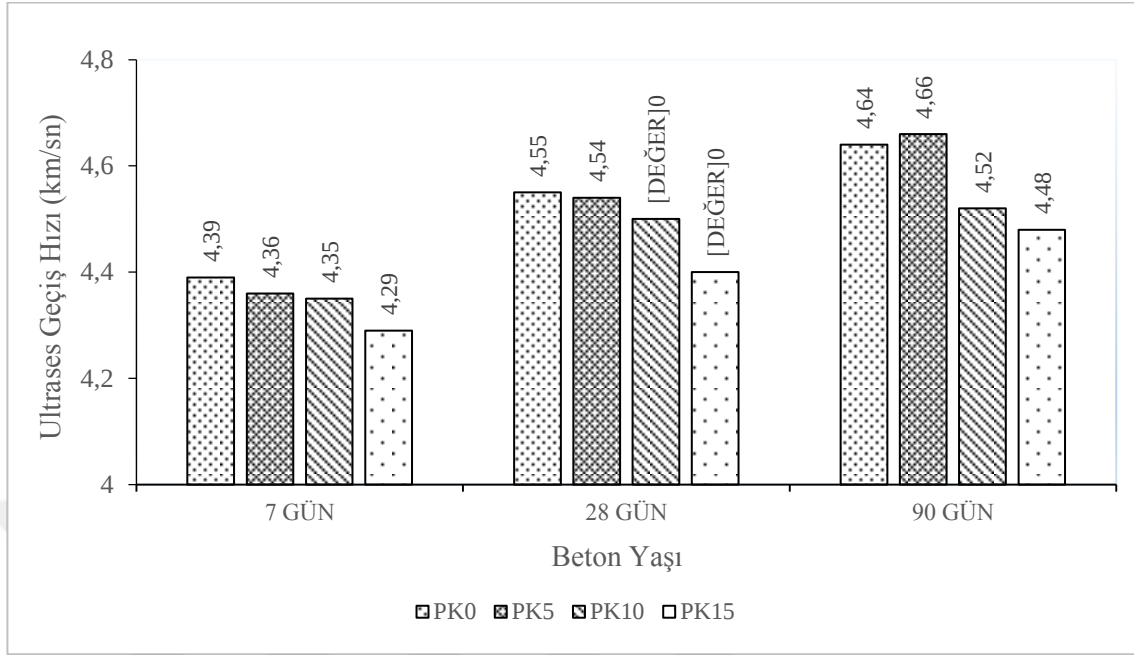
**Çizelge 4.3.** Sertleşmiş betonda birim ağırlık değerleri

| Karışım Türü  | Birim Hacim Ağırlık<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | Kontrol Numuneye Göre<br>Değişim (%) |
|---------------|---------------------------------------------|--------------------------------------|
| PK0 (Kontrol) | 2439                                        | -                                    |
| PK5           | 2408                                        | -1,27                                |
| PK10          | 2396                                        | -1,76                                |
| PK15          | 2356                                        | -3,40                                |

#### 4.2.2. Ultrases hızı deneyi

Çalışma kapsamında küp numunelerin tamamına ultrases geçiş hızı deneyi yapılmıştır. Beton içerisindeki boşluk miktarının bir göstergesi olan deneyde numunelerin ultrases geçiş hızlarında meydana gelen değişimler Şekil 4.4 ve Çizelge 4.4’de verilmektedir.

Yapılan çalışma sonucunda 7 gün sonunda en yüksek ultrases geçiş hızı referans örneklerde ölçülmüştür. Daha sonra ikame oranının artması ile ultrases geçiş hızında düşüşler gözlenmiştir. 28 gün sonunda benzer bir durum gözlenmiştir. 28 gün kür sonunda yapılan deneylerde referans numuneler en yüksek değere sahipken yine ikame oranındaki artış ultrases geçiş hızlarında düşüşe neden olmuştur. 90 gün sonunda yapılan ölçümlerde ise en yüksek değer %5 kül ikameli PK5 beton örneklerinde okunmuştur. Daha sonra değerlerde PK0, PK10 ve PK15 sırasıyla düşüş görülmüştür. Bu sonuçlar erken yaşlarda kül ikame oranı arttıkça beton içerisindeki boşlukların işlenebilirlikteki düşüşe bağlı olarak azaldığını, ilerleyen yaşlarda ise boşlukların azaldığını ve %5 ikame seviyesinde en düşük seviyede olduğunu göstermektedir.



**Şekil 4.4.** Kül ikameli betonların ultrases geçiş hızı değişimleri

7 ve 28 gün sonunda referans numuneler en yüksek ultrases değerine sahipken 90 gün sonunda %5 ikameli örnekler referans numunelerine göre %0,431'lik bir artışla en yüksek değeri vermiştir. Geri kalan tüm örnekler aynı yaşlarda kontrol numunelerinden daha düşük değerler vermişlerdir.

**Çizelge 4.4.** Beton türlerine göre ultrases geçiş hızı değerleri

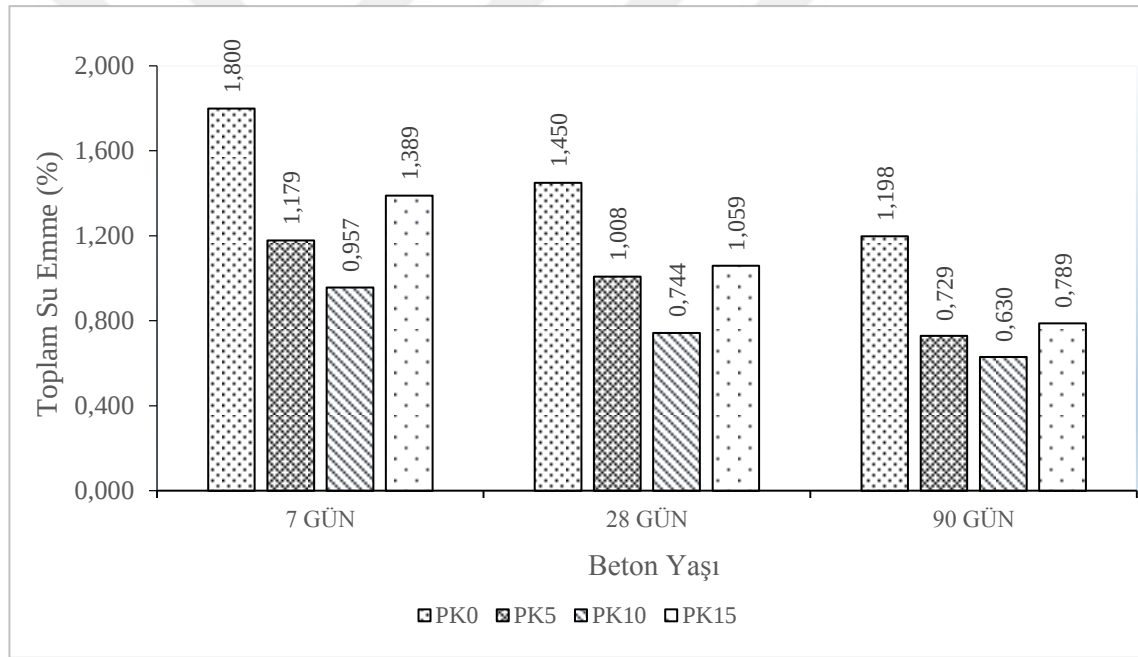
| Beton Türü | Ultrases Geçiş Hızı (km/sn) |         |         | Kontrole Göre Değişim (%) |         |         |
|------------|-----------------------------|---------|---------|---------------------------|---------|---------|
|            | 7. gün                      | 28. gün | 90. gün | 7. gün                    | 28. gün | 90. gün |
| PK0        | 4,39                        | 4,55    | 4,64    | -                         | -       | -       |
| PK5        | 4,36                        | 4,54    | 4,66    | -0,683                    | -0,220  | +0,431  |
| PK10       | 4,35                        | 4,50    | 4,52    | -0,911                    | -1,099  | -2,586  |
| PK15       | 4,29                        | 4,40    | 4,48    | -2,278                    | -3,297  | -3,448  |

Çatlak yoğunluğunun fazlalığı ve yüksek gözeneklilik, daha düşük ultrases değerleri verir (Saint-Pierre 2016). Kül ikame oranı ile artan boşluk oranı ultrases değerlerinin

düşmesinin başlıca nedenidir. (Padhi *et al.* 2018) pirinç kabuğu külü kullanarak yaptıkları çalışmada kül ilavesiyle ultrases geçiş hızlarının düştüğünü göstermişlerdir.

#### 4.2.3. Su emme deneyi

Çalışma kapsamında numuneler üzerinde su emme deneyi yapılmıştır. 7, 28 ve gün sonunda yapılan deney sonuçlarına göre tüm yaşlarda kontrol numunesi en yüksek su emme değerine sahiptir. İkame miktarının artması ile su emme değerini düşürürken %15 ikame oranından sonra su emme değerlerinde artış gözlenmiştir.



**Şekil 4.5.** Kül ikameli betonların su emme değerleri değişimleri

7 gün sonunda yapılan deneylere göre PK5 ve PK10 beton türlerinde referans numunelere göre su emme değerlerinde sırasıyla %34,50 ve %46,83 oranında azalma ölçülmüştür. Bu oranlar 28 gün sonunda %30,48 ve %48,69; 90 gün sonunda ise %39,15 ve %47,41 olarak ölçülmüştür. %15 ikameli örneklerde ise su emme değerleri referans numunelere göre düşük olmasına rağmen diğer ikame oranlarından yüksektir. PK15 beton örneklerinin su emme değerlerinde 7, 28 ve 90 gün sonunda sırasıyla %22,83, %26,97 ve %34,14'lük azalmalar ölçülmüştür.

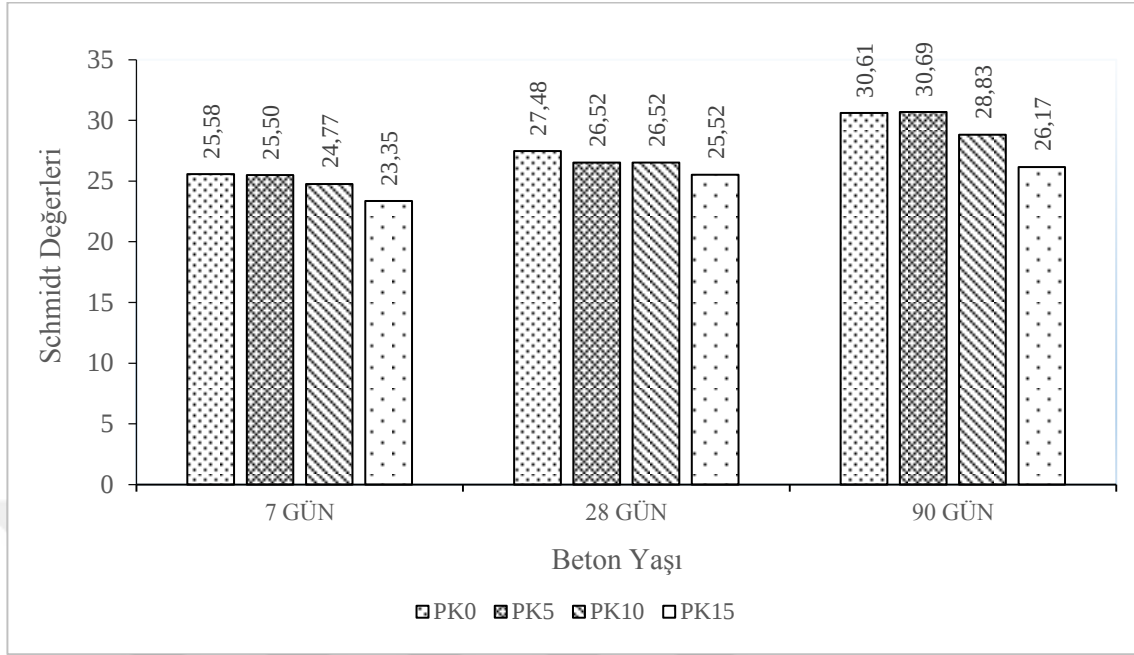
**Çizelge 4.5.** Beton örneklerinin su emme değerleri

| <b>Beton Türü</b> | <b>Toplam Su Emme (%)</b> |         |         | <b>Kontrole Göre Değişim (%)</b> |         |         |
|-------------------|---------------------------|---------|---------|----------------------------------|---------|---------|
|                   | 7. gün                    | 28. gün | 90. gün | 7. gün                           | 28. gün | 90. gün |
| PK0               | 1,800                     | 1,450   | 1,198   | -                                | -       | -       |
| PK5               | 1,179                     | 1,008   | 0,729   | -34,50                           | -30,48  | -39,15  |
| PK10              | 0,957                     | 0,744   | 0,630   | -46,83                           | -48,69  | -47,41  |
| PK15              | 1,389                     | 1,059   | 0,789   | -22,83                           | -26,97  | -34,14  |

Beton hidratasyonu devam ettikçe beton içerisindeki boşluklar hidratasyon ürünleri ile dolarak azalır. Bu durum zamanla beton örneklerinin su emme miktarını azaltır (Baradan vd 2012). Pirinç kabuğu külü ile harmanlanmış betonlarda, belli bir ikame oranına kadar numunelerin su emmesi kademeli olarak azalmakta, bu orandan daha yüksek değerlerde artış gözlenmektedir. Bu durum, PK külünün yüksek yüzey alanına bağlanmıştır. Ayrıca yüksek ikame oranlarında işlenebilirlikteki kademeli olarak azalma nedeniyle beton içerisinde boşluklar oluşur. Bu boşluklar da su emme oranının artmasında önemli derecede pay sahibidir (Kannan and Ganesan 2014).

#### 4.2.4. Schmidt deneyi

Çalışma kapsamında küp numunelerin tamamına schmidt test çekici ile schmidt deneyi yapılmıştır. Beton yüzeyinin sertliği ile beton basınç dayanımları arasında ilişki kurulmasına imkan sağlayan deneye ait sonuçlar Şekil 4.6 ve Çizelge 4.6'de verilmektedir. Schmidt çekici deney sonuçları basınç dayanımı sonuçlarını destekler niteliktedir. 7 günlük deney sonuçlarına göre en yüksek değer referans numunelerde 25,58 olarak okunmuştur. Kül ikame oranı arttıkça değerlerde de kademeli olarak düşüş gözlenmiştir. 28 günlük deney sonuçlarında yine en yüksek değer referans numunesinden okunmuş, kül ilavesiyle değerlerin yine düştüğü görülmüştür. 90 günlük deney sonuçlarına göre ise %5 kül ikame edilmiş numuneler 30,69 schmidt değeri ile en yüksek değere ulaşmıştır. Bu değeri referans numuneler daha sonra ise %10 ve %15 ikameli numuneler takip etmektedir.



**Şekil 4.6.** Kül ikameli betonların schmidt değeri değişimleri

7 günlük schmidt okumalarına göre PK5, PK10 ve PK15 örnekleri kontrol numuneye göre %8'lere varan oranlarda düşük değerler vermiştir. 28 gün sonunda benzer bir durum gözlenmiştir. 28 gün sonunda en düşük değer PK15 örneklerine ait olup kontrol örneklerine göre azalış %7 mertebelerindedir. 90 gün sonunda yapılan schmidt çekici okumalarına göre ise en yüksek değer içerisinde çimento ağırlığının %5'i oranında kül barındıran PK5 örneklerinden okunmuştur. PK5 beton türlerinde referans numunelere göre %0,26 oranında değer artışı gözlenirken, PK10 ve PK15 örnekleri %5,82 ve %14,51 oranlarında referans numunelerden düşük değerler vermiştir.

**Çizelge 4.6.** Beton örneklerinin schmidt değerleri

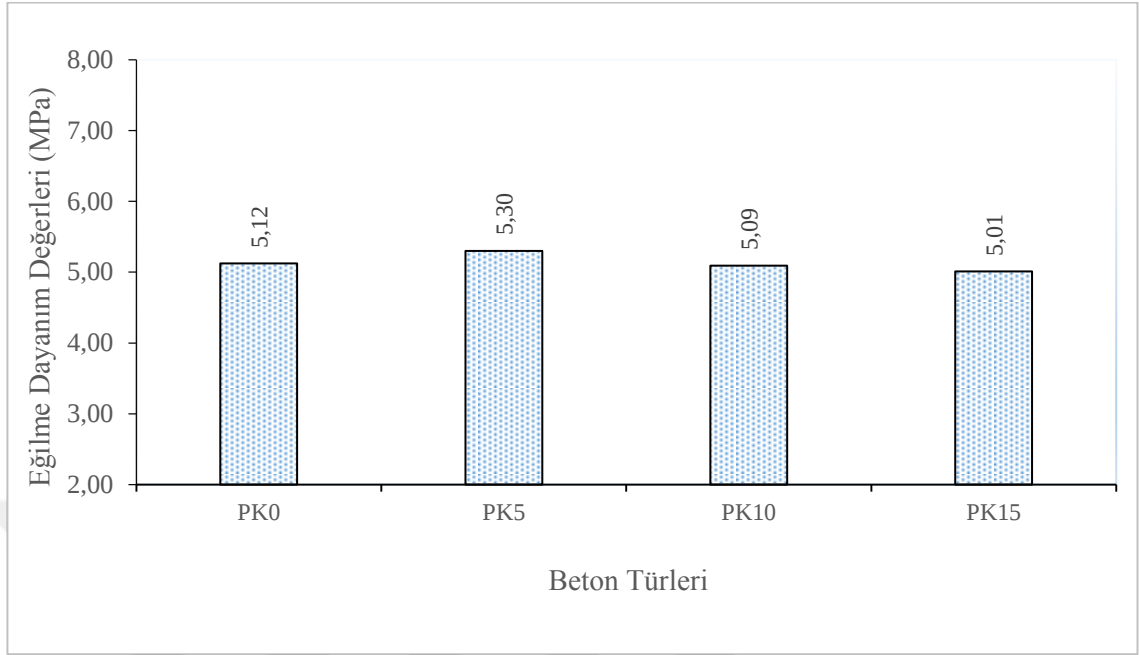
| Beton Türü | Schmidt Değerleri |         |         | Kontrole Göre Değişim (%) |         |         |
|------------|-------------------|---------|---------|---------------------------|---------|---------|
|            | 7. gün            | 28. gün | 90. gün | 7. gün                    | 28. gün | 90. gün |
| PK0        | 25,58             | 27,48   | 30,61   | -                         | -       | -       |
| PK5        | 25,50             | 26,52   | 30,69   | -0,31                     | -3,49   | +0,26   |
| PK10       | 24,77             | 26,52   | 28,83   | -3,17                     | -3,49   | -5,82   |
| PK15       | 23,35             | 25,52   | 26,17   | -8,72                     | -7,13   | -14,51  |

Schmidt test çekici yöntemi betonların yüzey sertliği ile dayanımları arasındaki ilişkiye dayandığından dayanımı yüksek olan bir betonun yüzeyinin de sert olduğu ve yüzeyden okunan schmidt çekici değerlerinin de yüksek olacağı söylenebilir. Qasravi (2000) Schmidt deneyi sonuçlarının betonların yüzey sertliklerine bağlı olduklarını ve betonun yüzeyinden 30-50 mm kalınlığındaki dış beton katmanını temsil ettiğini belirtmektedir. Yapılan bu çalışmada bulunan değerler ile örneklerin yüzey sertlikleri ölçülmüş ve de basınç dayanımları ile ilişkilendirilmiştir. Sonuçlara bakıldığında schmidt değerleri yüksek (yüzeyleri sert) olan numunelerin dayanımlarının da yüksek olduğu görülmüştür.

#### **4.2.5. Eğilme dayanımı**

Kiriş numuneler üzerinde 28 günlük kür süresinin sonunda eğilme deneyi yapılmıştır. Deney sonuçlarına göre en yüksek eğilme dayanımını %5 kül ikameli kiriş örnekleri göstermiştir. Dayanım sıralaması PK5, PK0, PK10 ve PK 15 şeklindedir. Deneye ait sonuçlar Şekil 4.7’de grafik olarak gösterilmiştir.

Şekil 4.7 incelendiğinde en yüksek eğilme dayanımı PK5 örneklerinde 5,30 MPa olarak ölçülmüştür. Referans betonların eğilme dayanımı ikinci sırada ve 5,12 MPa’dır. PK10 ve PK15 kiriş örnekleri sırasıyla 5,09 ve 5,01 MPa eğilme dayanımı göstermişlerdir.



**Şekil 4.7.** Kiriş numunelerin beton türlerine göre 28 günlük eğilme dayanımı değişimleri

Karışımındaki çimento miktarı %5 oranında pirinç kabuğu külü ile yer değiştirmiş kiriş örnekleri en yüksek eğilme dayanımını göstermiştir. Bu kiriş örnekleri kül katılmadan hazırlanan kirişlere göre %3,52 daha yüksek eğilme dayanımı sergilemişlerdir. PK10 ve PK15 betonları ise kontrol kirişlerine göre sırasıyla %0,59 ve %2,15 daha düşük eğilme dayanımına sahiptirler.

**Çizelge 4.7.** Kiriş numunelerin 28 günlük eğilme dayanım değerleri

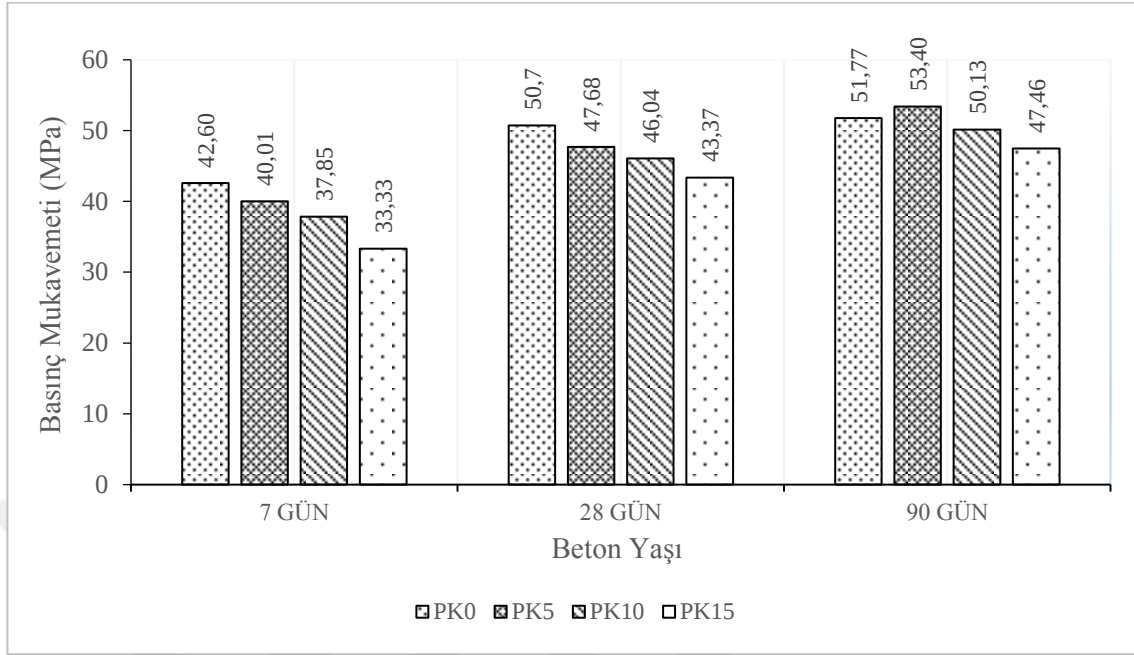
| Beton Türü | Eğilme Dayanımı (MPa) | Kontrol Numuneye Göre Değişim (%) |
|------------|-----------------------|-----------------------------------|
| PK0        | 5,12                  | -                                 |
| PK5        | 5,30                  | +3,52                             |
| PK10       | 5,09                  | -0,59                             |
| PK15       | 5,01                  | -2,15                             |

Betonun basınç dayanımından sonra en önemli özelliği olan çekme dayanımı, basınç dayanımına göre oldukça düşük mertebelerdedir. Basınç dayanımı ile çekme dayanımı doğru orantılıdır. Yani betonların basınç dayanımlarını artıran tüm etmenler çekme dayanımının artmasına da katkıda bulunur. Ancak çekme dayanımının artış hızı, basınç dayanımının artış hızına göre düşüktür (Baradan vd 2012). Abalaka (2013) betonlara pirinç kabuğu külü katılmasının belli bir ikame oranına kadar çekme dayanımında artış sağlayacağı, yüksek ikame oranlarında çekme dayanımını azaltıcı etki yapacağını yaptığı çalışmalarda göstermiştir.

#### **4.2.6. Basınç dayanımı**

Bu çalışmada, PK külü içeren ve içermeyen beton numunelerin basınç dayanımları 7, 28 ve 90 günün sonunda belirlenmiştir. Deney sonuçları Şekil 4.8 ve Çizelge 4.8’de verilmektedir.

Basınç deneyi sonuçlarına göre 7 gün sonunda en yüksek dayanımı referans numuneleri göstermiştir. Kül ikame oranı arttıkça basınç dayanımlarının da düştüğü görülmüştür. Benzer durum 28 gün sonunda yapılan deney sonuçlarında da görülmüştür. 28 gün sonunda referans numunesi en yüksek dayanımı göstermiş olmasına karşın kül ikamesi ile basınç dayanımlarının kademeli olarak düştüğü görülmüştür. Şekil 4.8’de görüldüğü üzere 90 gün sonunda yapılan basınç dayanımı deneyi sonucunda ise en yüksek dayanım PK5 numune gruplarında gözlenmiştir. PK5’i sırasıyla PK0, PK10 ve PK15 takip etmektedir.



**Şekil 4.8.** Kül ikameli betonların basınç dayanımı değişimleri

İkame kül oranı arttıkça basınç dayanımlarında erken yaşlarda azalmalar görülmüştür. Erken yaşlarda %21 lere varan azalmalar gerçekleşmiştir. 90 günlük sonuçlar incelendiğinde ise %5 ikameli numuneler referans numunelerinden %3,15 kadar daha yüksek bir dayanım sergilemiştir. %10 ve %15 kül ikameli numunelerde ise %3,17 ve 8,33'lük azalmalar görülmüştür. Bu sonuçlar pirinç kabuğu külü ikamesinin betona erken yaşlarda etkisinin az olduğunu fakat ilerleyen yaşlarda puzolanik etkilerinden dolayı dayanıma olumlu katkı yaptığını göstermektedir.

**Çizelge 4.8.** Beton numunelerin basınç dayanımı değerleri

| Beton Türü  | Basınç Dayanımı (MPa) |         |         | Kontrole Göre Değişim (%) |         |         |
|-------------|-----------------------|---------|---------|---------------------------|---------|---------|
|             | 7. gün                | 28. gün | 90. gün | 7. gün                    | 28. gün | 90. gün |
| <b>PK0</b>  | 42,60                 | 50,70   | 51,77   | -                         | -       | -       |
| <b>PK5</b>  | 40,01                 | 47,68   | 53,40   | -6,08                     | -5,96   | +3,15   |
| <b>PK10</b> | 37,85                 | 46,04   | 50,13   | -11,15                    | -9,19   | -3,17   |
| <b>PK15</b> | 33,33                 | 43,37   | 47,46   | -21,76                    | -14,46  | -8,33   |

Daha önceki yapılan çalışmalarda da benzer durumlar gözlenmiştir. Pirinç kabuğu külünün çimento yer değıştirme malzemesi olarak kullanıldığı birçok çalışma da olumlu sonuçlar bulunmuştur. Kül ikamesi ile numuneler ilerleyen yaşlarda kontrol numunesinin üzerinde basınç dayanımları göstermişlerdir (Sensale 2006; Madandoust *et al.* 2011; Khassaf *et al.* 2014; Ahsan *et al.* 2018).



## 5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu çalışmada, pirinç kabuğu külü ikame edilerek üretilen betonların fiziksel ve mekanik özellikleri araştırılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalarda elde edilen sonuçlar aşağıda belirtilmiştir.

Dünya nüfusunun büyük bir bölümünün temel besin maddesi olan pirincin işlenmesi aşamasında ortaya çıkan pirinç kabuğu çevre kirliliğine neden olmaktadır. Bu çevre kirliliğinin azaltılabilmesi ve de kabukların bertarafı için en iyi yollardan biri beton özelliklerine olan olumlu etkilerinden dolayı kabukların kül haline getirelerek beton içerisine katılmasıdır. Yapılan çalışmalarda pirinç kabuklarının toplandığı bölge ve kül elde aşamasında uygulanan işlemler bulunan sonuçlar arasında da farklılıklar olmasına neden olmuştur. Pirinç kabuğunun çevreye olan zararlarını azaltmak ve de beton üzerine olan etkilerini araştırmak için yapılan bu çalışmada, pirinç kabuğu külü üç farklı oranda çimento ile yerdeğiştirme (ikame) şeklinde kullanılmıştır. pirinç kabuğu küllerinin %5 ikame oranına kadar beton içerisinde kullanıldığında en iyi sonuçları verdiği, %10, %15 ikame oranlarında da hedeflenen dayanım değerlerini sağladığı görülmüştür. Pirinç tarımı yapılan alanlara yakın beton imalatlarında özellikle beton kullanılarak inşa edilen baraj ve yollarda sağlayacağı ekonomik, teknik ve çevresel avantajlarından dolayı pirinç kabuğu külünün kullanılabilir olduğu sonucuna varılmıştır.

Yapılan deneysel çalışmalarda elde edilen 7, 28 ve 90 günlük deney sonuçları irdelendiğinde şunları söylemek mümkündür:

Refereans ve ikameli beton türlerine ait taze beton deneyleri sonucunda birim hacim ağırlıklarda, ikame oranı arttıkça  $2449 \text{ kg/m}^3$  ten  $2375 \text{ kg/m}^3$ 'e varan düşüşler gözlenmiştir.

Taze beton örnekleri üzerinde yapılan slump (çökme) deneyi sonuçlarına göre karışımlara katılan kül miktarının artması harçların çökme miktarını belirgin şekilde

düşürmektedir. Çökme miktarının azalması da işlenebilirliğin azalması anlamına gelmektedir. Referans karışımlarda çökme değeri 150 mm iken kül ikamesi ile azalarak PK15 karışımlarında 105 mm olarak ölçülmüştür. Çökme değerinde %30 oranında azalma vardır.

Sertleşmiş beton örnekleri üzerinde yapılan birim hacim ağırlığı deneyine göre en yüksek değer kül ikamesi olmayan beton örneklerine aittir. Bu örneklerin birim hacim ağırlığı  $2439 \text{ kg/m}^3$  olarak ölçülmüştür. Kül ikamesi ile birim hacim ağırlıklar kademeli olarak azalmakta ve en düşük değer PK15 numunelerinde  $2356 \text{ kg/m}^3$  değerine kadar düşmektedir.

Ultrases geçiş hızı deney sonuçlarına göre 28. ve 90. gün sonunda PK0, PK5 ve PK10 beton türlerinde “mükemmel” olarak nitelendirilen  $4,50 \text{ km/s}$  sınırının üzerinde değerler okunmuştur. 7 günlük deney sonuçlarındaki beton türlerinin tamamı ve PK15 beton türleri her yaşta ultrases geçiş hızı bakımından “iyi” sınıfında yer almıştır. 7 ve 28 gün sonunda en yüksek ultrases değerleri referans numunelerine aittir. 90 günlük deney sonuçları incelendiğinde;

- Referans beton örneklerinin ultrases geçiş hızlarının  $4,64 \text{ km/s}$  olduğu,
- Kül ikame oranının %5 olması halinde bu değer  $0,431$  artışla  $4,66 \text{ km/s}$  olarak örnekler arasında en yüksek değere ulaştığı,
- PK10 ve PK15 beton türlerinin ultrases geçiş hızı değerlerini sırasıyla  $2,586$  ve  $3,448$  oranında azalttığı tespit edilmiştir.

Su emme deney sonuçlarına göre kül ikame oranı arttıkça tüm yaşlarda numunelerin su emme değerlerinin azaldığı görülmüştür. Her yaşta en fazla su emme referans numunelerine aittir. Betonların su emme değerleri yaşla birlikte azalmaktadır. Kül ikamesi ile %15 ikameli PK15 betonlarına kadar su emme değerleri azalmakta ancak PK15 örneklerinde artış gözlenmiştir. 90 günlük su emme değerleri incelendiğinde;

- En yüksek su emme değerinin  $1,198$  ile referans numunelerde olduğu

- %5 ve %10 ikame oranı ile bu değerlerin referans örneklere göre %39,15 ve %47,41 düştüğü,
- %15 ikameli örneklerde ise referans örneklere göre %34,14 düştüğü yani diğer ikameli örneklere göre arttığı görülmüştür.

Schmidt çekici deney sonuçlarına göre en yüksek schmidt değeri 90 gün sonunda %5 ikameli beton örneklerinde ölçülmüştür. 7 ve 28 gün sonunda yapılan okumalarda en yüksek değerleri referans örnekleri vermiştir. İkame oranı arttıkça schmidt okumaları da düşse dahi referans örneklere yakın değerler elde edilmiştir. 90 gün sonunda yapılan okumalarda ise %5 ikameli beton örnekleri 30,69 ile en yüksek değeri vermiştir. Bu referans değer okumalarına göre %0,26 lık artış anlamına gelmektedir. PK0, PK10 ve PK15 örnekleri ise sırasıyla 30,61, 28,83 ve 26,17'lik bir schmidt okuma değerleri vermiştir.

Eğilme deneyi sonuçlarına göre kül ikame edilmemiş referans betonunun 28 gün sonundaki eğilme dayanımı 5,12 MPa olarak ölçülmüştür. PK5 beton örneklerinin eğilme dayanımı 5,30 MPa olup referansın %3,52'si kadar yüksektir. PK10 betonunun eğilme dayanımı referans betonlara göre %0,59 düşüşle 5,09 MPa olarak ölçülmüştür. PK15 betonları ise 5,01 MPa eğilme dayanımları ile referansa göre %2,15 azalma göstermiştir. Sonuç olarak %5 kül ikamesinin referanstan yüksek olduğu ve %10 ikame oranına kadar da eğilme dayanımlarında önemli bir düşüş olmadığı görülmüştür.

Betonun en çok araştırılan özelliği olan basınç dayanımı deney sonuçları incelendiğinde ise;

- 7 günlük kür süresi sonunda en yüksek basınç dayanımı değeri referans betonlarda 42,60 MPa olarak ölçülmüştür. Kül ikame oranı ile birlikte basınç dayanımı değerlerinin azaldığı, PK5, PK10 ve PK15 beton türlerinin sırasıyla 40,01, 37,85 ve 33,33 MPa basınç dayanımı gösterdiği belirlenmiştir. Beton türlerine ait dayanım kaybı %6,08, %11,15 ve %21,76'dır.

- 28 gün sonunda yapılan basınç deneyi sonuçları 7 günlük sonuçlara paralellik göstermektedir. En yüksek basınç dayanımı referans betonlarda 50,7 MPa olarak ölçülmüştür. Kül ikame oranı ile birlikte basınç dayanımı değerlerinin azaldığı, PK5, PK10 ve PK15 beton türlerinin sırasıyla 47,68, 46,04 ve 43,37 MPa basınç dayanımı gösterdiği belirlenmiştir. Bu beton türlerine ait dayanım kaybı yine sırasıyla %5,96, %9,19 ve %14,46'dır.
- 90 gün sonunda yapılan deney sonuçlarına göre ise en yüksek basınç dayanımını %5 PK külü ikameli PK5 beton örnekleri göstermiştir. PK5 basınç dayanımı 53,40 MPa'dır ve 51,77 MPa basınç dayanımı gösteren referans betonuna göre %3,15 daha yüksek bir dayanım sergilemiştir. PK10 beton örnekleri 50,13 MPa basınç dayanımı değeri göstermiş olup referans betonlara göre %3,17 daha düşük bir değere sahiptir. PK15 betonları ise 47,46 MPa'lık basınç dayanım değerleri ile en düşük dayanım sergileyen beton türü olmuştur. PK15 referans betonlardan %8,33 daha düşük bir dayanım göstermiştir.
- PK külü ikamesinin erken yaşlarda basınç dayanımı değerlerine çok katkısı olmamasına rağmen ilerleyen yaşlarda olumlu katkısı olduğu görülmüştür. İkame oranı ile basınç dayanım değerlerinin düştüğü yalnız yine de hedeflenen basınç dayanımının her yaşta sağlanabildiği görülmüştür.

Sonuç olarak çalışmada ele alınan bütün pirinç kabuğu külü ikame oranlarının (%5~%15) hedeflenen C25/30 dayanım sınıfını sağlamış olması dolayısıyla beton yapımında kullanılabileceği kanısına varılmıştır. Gerçekleştirilen deney sonuçlarına göre optimum pirinç kabuğu külü ikame oranının %5 olduğu tespit edilmiştir.

Pirinç kabuğu külü ikame edilerek betonların dayanım ve durabilite özelliklerinin geliştirilebileceği görülmüştür. Çalışma kapsamında incelenen özelliklerin daha da gelişmeye açık olduğu söylenebilir. Farklı toprak türlerinde yetiştirilen pirinç kabukları ile üretilen betonların özellikleri de değişebileceğinden farklı bölgelerdeki pirinç kabukları da incelenebilir. Su/çimento oranı farklılığı ve kür şartları da pirinç kabuğu ikameli betonlarda önemli farklılıklar yaratabilir. Pirinç kabuğu yakma ve öğütme

koşullarının değıştirilmesi ile farklı özelliklerde üretilebilecek küller de inceleme konusu olabilir.



## KAYNAKLAR

- Abalaka, A. E., 2013. Strength and some durability properties of concrete containing rice husk ash produced in a charcoal incinerator at low specific surface. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 7(4), 287-293.
- Alex, J., Dhanalakshmi, J., Ambedkar, B., 2016. Experimental investigation on rice husk ash as cement replacement on concrete production. *Construction and Building Materials*, 127, 353-362.
- Alkaya, D., 2009. Uçucu Küllerin Zemin İyileştirmesinde Kullanılmasının İncelenmesi. *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 5(1), 61-72.
- Anonim, 1996. <http://www.sbb.gov.tr>, (08.07.2019)
- Anonim, 2017a. <http://www.artvin.gov.tr>, (06.08.2019)
- Anonim, 2017b. Artvin Halk Sağlığı Müdürlüğü (05.08.2019)
- Anonim, 2018a. <http://www.artvin.gov.tr>, (12.06.2019)
- Anonim, 2018b. <http://www.tcmb.org.tr>, (08.07.2019)
- Anonim, 2018c. <http://www.fao.org>, (01.08.2019)
- Anonim, 2019. <http://www.tmo.gov.tr>, (25.07.2019)
- ASTM C117, 2017. Standard test method for materials finer than 75- $\mu$ m (no. 200) sieve in mineral aggregates by washing. West Conshohocken, PA.
- ASTM C127, 2015. Standard test method for relative density (specific gravity) and absorption of coarse aggregate, West Conshohocken, PA.
- ASTM C128, 2015. Standard test method for relative density (specific gravity) and absorption of fine aggregate, West Conshohocken, PA.
- ASTM C131.2014. Standard test method for resistance to degradation of small-size coarse aggregate by abrasion and impact in the los angeles machine, West Conshohocken, PA.
- ASTM C618, 2019. Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete, West Conshohocken, PA.
- ASTM C642, 2013. Standard test method for density, absorption, and voids in hardened concrete. West Conshohocken, PA.
- Baradan, B., Yazıcı, H., Aydın, S., 2012. Beton. Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları, 825, İzmir.
- Bie, R. S., Song, X. F., Liu, Q. Q., Ji, X. Y., Chen, P., 2015. Studies on effects of burning conditions and rice husk ash (RHA) blending amount on the mechanical behavior of cement. *Cement and Concrete Composites*, 55, 162-168.
- Breccolotti, M., Bonfigli, M. F., Materazzi, A. L., 2013. Influence of carbonation depth on concrete strength evaluation carried out using the SonReb method. *NDT and E International*, 2013, 59, 96-104.
- Chopra, D., Siddique, R., Kunal, 2015. Strength, permeability and microstructure of self-compacting concrete containing rice husk ash. *Biosystems Engineering*, 130, 72-80.
- Christopher, F., Bolatito, A., Ahmed, S., 2017. Structure and properties of mortar and concrete with rice husk ash as partial replacement of ordinary Portland cement. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 6, 675-692.

- Dayı, M., 2006. Dogal ve yapay puzolanların kompoze çimento üretiminde kullanılabilirliğinin araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- De Souza Rodrigues, C., Ghavami, K., Stroeven, P., 2010. Rice Husk Ash as a Supplementary Raw Material for the Production of Cellulose–Cement Composites with Improved Performance. *Waste and Biomass Valorization*, 1(2), 241-249.
- Demirboğa, R., Örüng, İ., Gül, R., 2001. Effects of expanded perlite aggregate and mineral admixtures on the compressive strength of low-density concretes. *Cement and Concrete Research*, 31, 1627-1632.
- Erdoğan, T. Y., 2007. Beton. ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş., 757, Ankara.
- Ferraro, R. M., Nanni, A., 2012. Effect of off-white rice husk ash on strength, porosity, conductivity and corrosion resistance of white concrete. *Construction and Building Materials*, 31, 220-225.
- Gerwick Jr, B. C., 1997. Construction of prestressed concrete structures. John Wiley and Sons. 591 p, New York.
- Ghiasvand, E., Ramezaniapour, A. A., Ramezaniapour, A. M., 2014. Effect of grinding method and particle size distribution on the properties of Portland-pozzolan cement. *Construction and Building Materials*, 53, 547-554.
- Gündeşli, U., 2008. Uçucu Kül, Silis Dumanı Ve Yüksek Fırın Cürufunun Beton Ve Çimento Katkısı Olarak Kullanımı Üzerine Bir Kaynak Taraması. Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Habeeb, G. A., Fayyadh, M. M., 2009. Rice Husk Ash Concrete: the Effect of RHA Average Particle Size on Mechanical Properties and Drying Shrinkage. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 3(3), 1616-1622.
- Hamzeh, Y., Ziabari, K. P., Torkaman, J., Ashori, A., Jafari, M., 2013. Study on the effects of white rice husk ash and fibrous materials additions on some properties of fibrecement composites. *Journal of Environmental Management*, 117, 263-267.
- He, Z. H., Li, L.Y., Du, S. G., 2017. Creep analysis of concrete containing rice husk ash. *Cement and Concrete Composites*, 80, 190-199.
- İşbilir, B., 2012. Pirinç kabuğu külü ikameli çimento numunelerinin mekanik özelliklerinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Düzce.
- Jamil, M., Han, M. N. N., Karim, M. R., Kaish, A.B. M. A., Zain, M. F. M., 2016. Physical and chemical contributions of Rice Husk Ash on the properties of mortar. *Construction and Building Materials*, 128, 185-198.
- Kang, S. H., Hong, S. G., Moon, J., 2019. The use of rice husk ash as reactive filler in ultra-high performance concrete. *Cement and Concrete Research*, 115, 389-400.
- Kannan, V., Ganesan, K., 2014. Chloride and chemical resistance of self compacting concrete containing rice husk ash and metakaolin. *Construction and Building Materials*, 51, 225-234.
- Khan, W., Shehzada, K., Bibi, T., Islam, S. U., Khan, S. W., 2018. Performance evaluation of Khyber Pakhtunkhwa Rice Husk Ash (RHA) in improving mechanical behavior of cement. *Construction and Building Materials*, 176, 89-102.

- Khassaf, S. I., Jasim, A. T., Mahdi, F. K., 2014. Investigation The Properties Of Concrete Containing Rice Husk Ash To Reduction The Seepage In Canals. *International Journal Of Scientific and Technology Research*, 3(4).
- Koçak, Y., 2008. Çimento-puzolan etkileşiminde moleküler ve elektrokinetik davranışların araştırılması. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Koushkbaghi, M., Kazemi, M. J., Mosavi, H., Mohseni, E., 2019. Acid resistance and durability properties of steel fiber-reinforced concrete incorporating rice husk ash and recycled aggregate. *Construction and Building Materials*, 202, 266-275.
- Madandoust, R., Ranjbar, M. M., Moghadam, H. A., Mousavi, S. Y., 2011. Mechanical properties and durability assessment of rice husk ash concrete. *Biosystems Engineering*, 110(2), 144-152.
- Mamlouk, M. S., Zaniewski, J. P., 2006. *Materials for civil and construction engineers* Upper Saddle River, 576 p, New Jersey.
- Martirena, F., Monzó, J., 2018. Vegetable ashes as supplementary cementitious materials. *Cement and Concrete Research*, 114, 57-64.
- Miller, S. A., Cunningham, P. R., Harvey, J. T., 2019. Rice-based ash in concrete: A review of past work and potential environmental sustainability. *Resources, Conservation and Recycling*, 146, 416-430.
- Nair, D. G., Fraaij, A., Klaassen, A. A., Kentgens, A. P., 2008. A structural investigation relating to the pozzolanic activity of rice husk ashes. *Cement and Concrete Research*, 38(6), 861-869.
- Najimi, M., Ghafoori, N., 2019. Engineering properties of natural pozzolan/slag based alkali-activated concrete. *Construction and Building Materials*, 208, 46-62.
- Neville, A.M., 1986. *Properties of Concrete*. Longman Scientific and Technical, 779 p, England.
- Olutoge, F. A., Adesina, P. A., 2019. Effects of rice husk ash prepared from charcoal-powered incinerator on the strength and durability properties of concrete. *Construction and Building Materials*, 196, 386-394.
- Padhi, R. S., Patra, R. K., Mukharjee, B. B., Dey, T., 2018. Influence of incorporation of rice husk ash and coarse recycled concrete aggregates on properties of concrete. *Construction and Building Materials*, 173, 289-297.
- Panedpojaman, P., Tonnayopas, D., 2018. Rebound hammer test to estimate compressive strength of heat exposed concrete. *Construction and Building Materials*, 172, 387-395.
- Qasrawi, H. Y., 2000. Concrete strength by combined nondestructive methods simply and reliably predicted. *Cement and Concrete Research*, 30(5), 739-746.
- Rahman, M. E., Muntohar, A. S., Pakrashi, V., Nagaratnam, B. H., Sujana, D., 2014. Self compacting concrete from uncontrolled burning of rice husk and blended fine aggregate. *Materials- Design*, 55, 410-415.
- Ramezaniapour, A. A., Khani, M. M., Ahmadibeni, G., 2009. The Effect of Rice Husk Ash on Mechanical Properties and Durability of Sustainable Concretes. *International Journal of Civil Engineering*, 7(2), 83-91.
- Saint-Pierre, F., Philibert, A., Giroux, B., Rivard, P., 2016. Concrete quality designation based on ultrasonic pulse velocity. *Construction and Building Materials*, 125, 1022-1027.

- Salas, A., Delvasto, S., de Gutierrez, R. M., Lange, D., 2009. Comparison of two processes for treating rice husk ash for use in high performance concrete. Cement and concrete research, 39(9), 773-778.
- Sverak, T. S., Baker, C. G. J., Kozdas, O., 2013. Efficiency of grinding stabilizers in cement clinker processing. Minerals Engineering, 43, 52-57.
- Şengül, Ö., Taşdemir, M. A., Gjorv, O. E. 2007. Puzolanik malzemelerin betonun mekanik özellikleri ve klor iyonu yayılımına etkisi. İTÜ Dergisi, 6(1), 53-64.
- Thomas, B. S., 2018. Green concrete partially comprised of rice husk ash as a supplementary cementitious material—A comprehensive review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 82, 3913-3923.
- TS 1247, 2018. Beton yapım, döküm ve bakım kuralları (Normal hava koşullarında). TSE., Ankara.
- TS 706 EN 12620+A1, 2009. Beton agregaları. TSE., Ankara.
- TS 802, 2016. Beton karışım tasarımı hesap esasları. TSE., Ankara.
- TS 9748 EN 27888, 1996. Su kalitesi-Elektriksel iletkenlik tayini. TSE., Ankara.
- TS EN 1008, 2003. Beton-Karma suyu. TSE., Ankara.
- TS EN 1097-3, 1999. Agregaların fiziksel ve mekanik özellikleri için deneyler bölüm 3: Gevşek yığın yoğunluğunun ve boşluk hacminin tayini. TSE., Ankara.
- TS EN 12350-1, 2010. Beton- Taze Beton Deneyleri- Bölüm 1: Numune Alma. TSE., Ankara.
- TS EN 12350-2, 2010. Beton- Taze Beton Deneyleri- Bölüm 2: Çökme Deneyi. TSE., Ankara.
- TS EN 12350-6, 2010. Beton- Taze Beton Deneyleri- Bölüm 6: Yoğunluk. TSE., Ankara.
- TS EN 12390-1, 2013. Beton-Sertleşmiş Beton Deneyleri-Bölüm 1: Deney Numunesi ve kalıplarının şekil, boyut ve diğer özellikleri. TSE., Ankara.
- TS EN 12390-2, 2010. Beton-Sertleşmiş Beton Deneyleri-Bölüm 2: Dayanım Deneylerinde Kullanılacak Deney Numunelerinin Hazırlanması ve Küre Tabi Tutulması. TSE., Ankara
- TS EN 12390-3, 2010. Beton-Sertleşmiş Beton Deneyleri-Bölüm 3: Deney Numunelerinde Basınç Dayanımının Tayini. TSE., Ankara.
- TS EN 12390-5, 2010. Beton-Sertleşmiş Beton Deneyleri-Bölüm 5: Deney Numunelerinin Eğilme Dayanımının Tayini. TSE., Ankara.
- TS EN 12390-7, 2010. Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 7: Sertleşmiş beton yoğunluğunun tayini. TSE., Ankara.
- TS EN 12504-2, 2013. Yapılarda beton deneyleri - Bölüm 2: Tahribatsız muayene - Geri sıçrama sayısının belirlenmesi. TSE., Ankara.
- TS EN 12504-4, 2004. Beton deneyleri - Bölüm 4: Ultrases geçiş hızının tayini. TSE., Ankara.
- TS EN 197-1, 2012. Çimento- Bölüm 1: Genel Çimentolar- Bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri. TSE., Ankara.
- TS EN 206:2013+A1, 2017. Beton- Özellik, performans, imalat ve uygunluk. TSE., Ankara.
- TS EN 450-1, 2013 Uçucu kül - Betonda kullanılan - Bölüm 1: Tarif, özellikler ve uygunluk kriterleri. TSE., Ankara.
- TS EN 933-1, 2012. Agregaların Geometrik Özellikleri için Deneyler- Bölüm 1:Tane büyüklüğü dağılımının tayini- Eleme yöntemi. TSE., Ankara.

- TS EN 933-9, 2010. Agregaların Geometrik Özellikleri için Deneyler- Bölüm 9: İnce Tanelerin Tayini- Metilen Mavisi Deneyi. TSE., Ankara.
- TS ISO 3310-2, 2015. Deney elekleri - Teknik özellikler ve deneyler - Bölüm 2: Delikli metal plakalı deney elekleri. TSE., Ankara.
- Wei, J., Gencturk, B., 2019. Hydration of ternary Portland cement blends containing metakaolin and sodium bentonite. Cement and Concrete Research, 123, 105772.
- Yalçın, H., Gürü, M., 2006. Çimento ve Beton. Palme Yayıncılık, 406 s, Ankara.
- Yıldız, S., Balaydın, İ., Ulucan, Z. Ç., 2007. Pirinç kabuğu külünün beton dayanımına etkisi. Fırat Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 19(1), 85-91.
- Zhang, R., Panesar, D. K., 2018. Water absorption of carbonated reactive MgO concrete and its correlation with the pore structure. Journal of CO<sub>2</sub> Utilization, 24, 350-360
- Zhang, Y. M., Napier-Munn, T. J., 1995. Effects of particle size distribution, surface area and chemical composition on Portland cement strength. Powder Technology, 83(3), 245-252.
- Ziari, H., Barakoochi, A. T., Moniri, A., 2017. Laboratory investigation of the effect of temperature on frictional properties of concrete pavements containing crushed glass. International Journal of Pavement Research and Technology, 10(4), 297-303.

## ÖZGEÇMİŞ

1990 yılında Artvin İli Yusufeli İlçesinde doğdu. İlk, orta öğrenimini Artvin’de, lise öğrenimini Bursa’da tamamladı. Balıkesir Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümünden 2013 yılında mezun oldu. 2013-2016 yılları arasında özel bir inşaat firmasında İnşaat Mühendisi olarak görev yaptı. 2016 yılından itibaren Artvin Çoruh Üniversitesi İnşaat Bölümü’nde Öğretim Görevlisi olarak görev yapmaktadır. 2015 yılından itibaren Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Bölümü’nde yüksek lisansına devam etmektedir.