



**BETON ÜRETİMİNDE PUZOLAN OLARAK
ÇELTİK KAVUZU KÜLÜNÜN
KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI**

Ahmet Taner AYDIN

Doktora Tezi

**Biyosistem Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Can Burak ŞİŞMAN**

2022

T.C.
TEKİRDAĞ NAMIK KEMAL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DOKTORA TEZİ

**BETON ÜRETİMİNDE PUZOLAN OLARAK ÇELTİK KAVUZU KÜLÜNÜN
KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI**

Ahmet Taner AYDIN

BİYOSİSTEM MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMAN: Prof. Dr. Can Burak ŞİŞMAN

TEKİRDAĞ-2022

Her hakkı saklıdır.

ÖZET

Doktora Tezi

BETON ÜRETİMİNDE PUZOLAN OLARAK ÇELTİK KAVUZU KÜLÜNÜN KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

Ahmet Taner AYDIN

Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Biyosistem Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Can Burak ŞİŞMAN

İnşaat sektöründe kullanılan malzemelerin başında beton gelmektedir. Beton özelliklerini geliştirmek, dayanıklılığını artırmak ve daha ekonomik bir beton üretebilmek adına puzolanik malzemeler kullanılmaktadır. Betonda puzolan olarak birçok malzeme kullanılabilen ve bunlar arasında birçok tarımsal atık malzemelerden üretilen biyoyakıtların yakılması ile elde edilen küller de kullanılmaktadır. Biyoyakıt olarak kullanılan tarımsal ürünlerden bir tanesi de çeltik kavuzlarıdır. Bu çalışmada çeltik kavuzlarının yanması sonucu oluşan küllerin beton üretiminde puzolan olarak kullanılmasının betonun fiziksel, mekanik ve termal özellikleri üzerine etkilerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla, 200, 250, 300 ve 400 olmak üzere dört farklı dozajda ve ağırlık yüzdesi olarak %0, %5, %10 ve %20 oranlarında çeltik kavuzu külü ile çimento yer değiştirilerek beton örnekleri dökülmüştür. Üretilen örnekler üzerinde birim ağırlık (BA), su emme (SE), basınç dayanımı (BD), yarmada çekme dayanımı (YD), donma çözünmeye dayanım (DÇD), ısı iletkenlik deneyleri yapılmıştır. Ayrıca her katkı oranı ve her dozaj miktarı için örneklerin mikro yapıları SEM görüntüleri yardımıyla incelenmiştir. Araştırma sonuçlarına göre, sertleşmiş haldeki birim ağırlıklarda en yüksek BA değerleri 400 dozajda üretilen çeltik kavuzu külü katkılı betonlarda, en düşük BA değerleri de %20 çeltik kavuzu külü ikamesi için elde edilmiştir. 400 dozajda çeltik kavuzu %20 oranındaki kül ikamesi hiç kül katılmayan örneğe kıyasla BA değerinde %4,96 oranında azalma oluşturmuş ve yüksek dozajlı ve yüksek mukavemetli betonların kullanıldığı tarımsal yapılarda ölü yükün azaltılması açısından önemli bir etki sağladığı belirlenmiştir. 250 dozajda çeltik kavuzu külü kullanılarak üretilen örneklerde; şahit numuneye kıyasla tüm kür süreleri için %5 çeltik kavuzu katkılı örneklerde basınç dayanımında artışlar görülmüştür. Bu durum, 250 dozaj betonda kullanılabilir en ideal kül yüzdesi hakkında önemli fikir vermekle birlikte bu oranın %5 olduğu değerlendirilmiştir. Sıcaklık farkının fazla olduğu bölgelerde, çimento miktarı bakımından en ideal dozaj için şahit örneğe kıyasla donma çözünme çevrimi sonrasında basınç dayanım kaybının %20'den az olduğu dozaj sadece 200 dozajlı çeltik kavuzu kül ikameli beton grubunda görülmüş ve diğer gruplarda bu dayanım kaybının %20'den fazla olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Çeltik kavuzu külü ağırlık yüzdesi olarak %5 ile %10 arasında kullanıldığında; daha dayanıklı, daha çevreci ve daha ekonomik betonlar üretmek mümkün olabilir.

Anahtar Kelimeler: Beton, Çimento, Çeltik Kavuzu Külü, Tarımsal Yapılar, Puzolan

2022, 90 sayfa

ABSTRACT

PhD Thesis

INVESTIGATING OF THE USAGE OF RICE HUSK ASH AS A PUZZOLONE IN CONCRETE PRODUCTION

Ahmet Taner AYDIN

Tekirdağ Namık Kemal University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Biosystem Engineering

Supervisor: Prof.Dr. Can Burak ŞİŞMAN

Concrete is the leading material used in the construction industry. Pozzolonic materials are used to improve concrete properties, increase durability and produce more economical concrete. Many materials can be used as pozzolans in concrete, among which ashes obtained by burning biofuels produced from many agricultural waste materials are also used. One of the agricultural products used as biofuel is rice husks. In this study, it was aimed to determine the effects of using the ashes formed as a result of the burning of rice husks as a pozzolan in the production of concrete on the physical, mechanical and thermal properties of concrete. For this purpose, concrete samples were poured by replacing rice husk ash with cement in four different dosages, 200, 250, 300 and 400, and at 0%, 5%, 10% and 20% weight percent. Unit weight (UW), water absorption, compressive strength, splitting tensile strength, freeze-thaw resistance, thermal conductivity tests were carried out on the produced samples. In addition, the microstructures of the samples for each additive ratio and each dosage amount were examined with the help of SEM images. According to the results of the research, the highest UW values in hardened unit weights were obtained in the concrete with rice husk ash added at 400 dosage, and the lowest UW values were obtained for 20% rice husk ash substitution. It has been determined that the ash substitution of 20% in rice husk at 400 dosage has reduced the UW value by 4.96% compared to the sample without ash, and it has been determined that it has a significant effect in terms of reducing dead load in agricultural structures where high dosage and high strength concretes are used. In the samples produced using rice husk ash at 250 dosage; Compared to the witness sample, increases in compressive strength were observed in the samples with 5% rice husk for all curing times. Although this gives an important idea about the ideal ash percentage that can be used in 250 dosage concrete, this ratio was evaluated to be 5%. In regions where the temperature difference is high, for the optimum dosage in terms of cement amount, the dosage where the compressive strength loss is less than 20% after the freeze-thaw cycle compared to the witness sample was seen only in the 200 dosage rice husk ash substituted concrete group, and this strength loss was more than 20% in the other groups. As a result, when rice husk ash is used as a weight percent between 5 and 10%; It may be possible to produce stronger, more environmentally friendly and more economical concretes.

Keywords: Concrete, Cement, Rice Husk Ash, Agricultural Structures, Pozzolan

2022, 90 pages

İÇİNDEKİLER

| | |
|--|------------|
| ÖZET | i |
| ABSTRACT | ii |
| İÇİNDEKİLER | iii |
| ÇİZELGE DİZİNİ | v |
| ŞEKİL DİZİNİ | vi |
| SİMGELER ve KISALTMALAR | vii |
| TEŞEKKÜR | ix |
| 1. GİRİŞ | 1 |
| 2. KAYNAK ÖZETLERİ | 3 |
| 2.1. Beton Bileşenleri | 4 |
| 2.1.1. Çimento | 4 |
| 2.1.2. Agregası | 7 |
| 2.1.3. Su | 10 |
| 2.1.4. Puzolanlar | 11 |
| 2.1.4.1. Doğal Puzolanlar | 14 |
| 2.1.4.2. Yapay Puzolanlar | 15 |
| 2.1.4.3. Puzolanik Özellikleri Olan Tarımsal Atıklar | 18 |
| 2.2. Çeltik Kavuzu Külü (ÇKK) | 21 |
| 3. MATERYAL VE YÖNTEM | 27 |
| 3.1. Materyal | 27 |
| 3.1.1. Agregası | 27 |
| 3.1.2. Çimento | 28 |
| 3.1.3. Su | 29 |
| 3.1.4. Çeltik Kavuzu Külü (ÇKK)..... | 30 |
| 3.2. Yöntem..... | 31 |
| 3.2.1. Taze Beton Deneyleri | 34 |
| 3.2.1.1. Sabit Çökme Deneyi ve Su / Çimento Oranı | 34 |
| 3.2.1.2. Sıcaklık | 34 |
| 3.2.2. Sertleşmiş Beton Deneyleri | 35 |
| 3.2.2.1. Birim Ağırlık Deneyi..... | 35 |
| 3.2.2.2. Su Emme Deneyi | 35 |
| 3.2.2.3. Basınç Dayanımı Deneyi | 36 |

| | |
|--|-----------|
| 3.2.2.4. Yarmada Çekme Dayanımı Deneyi | 37 |
| 3.2.2.5. Donma Çözünme Deneyi..... | 38 |
| 3.2.2.6. Isı İletkenlik Katsayısının Belirlenmesi | 39 |
| 3.2.2.7. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Görüntüsü | 40 |
| 4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA..... | 41 |
| 4.1. Taze Beton Deneyleri | 41 |
| 4.1.1. Su / Çimento Oranı | 41 |
| 4.1.2. Taze Beton Sıcaklıkları | 42 |
| 4.2. Sertleşmiş Beton Deneyleri..... | 43 |
| 4.2.1. Birim Ağırlık (BA) | 43 |
| 4.2.2. Su Emme | 44 |
| 4.2.3. Basınç Dayanımı..... | 46 |
| 4.2.4. Yarmada Çekme Dayanımı | 51 |
| 4.2.5. Donma Çözünme | 52 |
| 4.2.6. Isı İletim | 54 |
| 4.2.7. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Mikro Yapı incelemesi..... | 56 |
| 4.2.8. Maliyet Analizi | 58 |
| 4.2.9. ÇKK Beton Özelliklerinin Karşılaştırılması | 61 |
| 5. SONUÇ VE ÖNERİLER..... | 63 |
| KAYNAKLAR | 67 |

ÇİZELGE DİZİNİ

| | |
|--|----|
| Çizelge 2.1. TS EN 197-1 Çimento çeşitleri | 6 |
| Çizelge 3.1. Kullanılan agreganın fiziksel özellikleri..... | 28 |
| Çizelge 3.2. Kullanılan çimentonun fiziksel ve kimyasal özellikleri | 29 |
| Çizelge 3.3. Kullanılan suyun Kimyasal Analiz Sonuçları | 29 |
| Çizelge 3.4. Çeltik kavuzu kül özellikleri | 30 |
| Çizelge 3.5. Dökülen örnekler için yapılan nihai tasarım hesabı | 32 |
| Çizelge 4.1. Çökme değeri 12 ± 1 için su/çimento oranları..... | 41 |
| Çizelge 4.2. Taze beton sıcaklıkları | 42 |
| Çizelge 4.3. Dozaj ve yüzde oranına göre birim ağırlık değişimi ve varyans analizi | 43 |
| Çizelge 4.4. Dozaj ve yüzde oranına göre su emme ve varyans analizi | 45 |
| Çizelge 4.5. Tüm dozajlar için yüzde oranı ve kür süresine göre basınç dayanımı sonuçlarının varyans analizi | 47 |
| Çizelge 4.6. Dozaj ve yüzde oranına göre 28 günlük basınç dayanımı sonuçlarının varyans analizi | 50 |
| Çizelge 4.7. Dozaj ve yüzde oranına göre yarma dayanımı sonuçlarının varyans analizi | 51 |
| Çizelge 4.8. Dozaj ve yüzde oranına göre donma-çözünme sonuçlarının varyans analizi | 53 |
| Çizelge 4.9. Numunelerin dozaj ve yüzde oranına göre ısı iletimi sonuçlarının varyans analizi | 54 |
| Çizelge 4.10. Kullanılan malzeme birim fiyatları | 59 |
| Çizelge 4.11. Üretilen 1 m ³ beton için mali kazanç | 60 |

ŞEKİL DİZİNİ

| | |
|---|----|
| Şekil 2.1. Ülkelerin 2019/2020 yılı dünya pirinç üretim miktarları (ton) | 22 |
| Şekil 3.1. Agrega granülometri eğrisi | 27 |
| Şekil 3.2. ÇKK'nin (SEM) görüntüleri | 31 |
| Şekil 3.3. Dökülen örnekler | 33 |
| Şekil 3.4. Çökme (Slump) deneyi | 35 |
| Şekil 3.5. Numunelerin su emme deneyindeki etüv görüntüsü | 36 |
| Şekil 3.6. Hidrolik pres | 37 |
| Şekil 3.7. Yarmada çekme deneyi | 38 |
| Şekil 3.8. Donma çözünme çevrimindeki örnekler | 39 |
| Şekil 3.9. Isı iletim katsayısı ölçüm cihazı | 39 |
| Şekil 3.10. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) | 40 |
| Şekil 4.1. Duncan sınıflandırma analiz sonuçlarına göre sertleşmiş beton birim ağırlık değişimi | 44 |
| Şekil 4.2. Duncan sınıflandırma analiz sonuçlarına göre dozaj ve kül oranına bağlı olarak su emme düzeyleri | 46 |
| Şekil 4.3. Duncan sınıflandırma analiz sonuçlarına göre tüm dozajlar kül oranlarına ve kür süresine bağlı olarak basınç dayanımları | 49 |
| Şekil 4.4. Duncan sınıflandırma analiz sonuçlarına göre dozaj ve kül oranına bağlı olarak basınç dayanımları | 50 |
| Şekil 4.5. Duncan sınıflandırma analiz sonuçlarına göre dozaj ve kül oranına bağlı olarak yarma dayanımları | 52 |
| Şekil 4.6. Duncan sınıflandırma analiz sonuçlarına göre dozaj ve kül oranına bağlı olarak donma-çözünme dayanımları | 54 |
| Şekil 4.7. Duncan sınıflandırma analiz sonuçlarına göre dozaj ve kül oranına bağlı olarak ısı iletim sonuçları | 56 |
| Şekil 4.8. ÇKK 200 SEM görüntüleri | 57 |
| Şekil 4.9. ÇKK 250 SEM görüntüleri | 57 |
| Şekil 4.10. ÇKK 300 SEM görüntüleri | 58 |
| Şekil 4.11. ÇKK 400 SEM görüntüleri | 58 |
| Şekil 4.12. ÇKK betonların basınç ve yarma dayanımı arasındaki ilişki | 61 |
| Şekil 4.13. ÇKK betonların basınç dayanımı ve su/çimento miktarları arasındaki ilişki | 62 |
| Şekil 4.14. ÇKK betonların basınç dayanımı ve donma çözünme dayanımı arasındaki ilişki. 62 | |

SİMGELER VE KISALTMALAR

| | |
|------------|--|
| TÜİK | : Türkiye İstatistik Kurumu |
| kg | : Kilogram |
| dm | : Desimetre |
| C50 | : 50 Mega Pascal beton basınç dayanımı |
| CSH | : Kalsiyum silikat hidrat |
| C3S | : Trikalsiyum silikat |
| ÇKK | : Çeltik kavuzu külü |
| W/mK | : Isıl iletkenlik hesap değeri |
| Mpa | : Mega Pascal |
| µm | : Mikrometre |
| HCL | : Hidroklorik asit |
| SEM | : Scanning electronic microscope |
| ÇKK 200-0 | : 200 dozaj %0 kül içeren örnek |
| ÇKK 200-5 | : 200 dozaj %5 kül içeren örnek |
| ÇKK 200-10 | : 200 dozaj %10 kül içeren örnek |
| ÇKK 200-20 | : 200 dozaj %20 kül içeren örnek |
| ÇKK 250-0 | : 250 dozaj %0 kül içeren örnek |
| ÇKK 250-5 | : 200 dozaj %5 kül içeren örnek |
| ÇKK 250-10 | : 200 dozaj %10 kül içeren örnek |
| ÇKK 250-20 | : 200 dozaj %20 kül içeren örnek |
| ÇKK 300-0 | : 300 dozaj %0 kül içeren örnek |
| ÇKK 300-5 | : 300 dozaj %5 kül içeren örnek |
| ÇKK 300-10 | : 300 dozaj %10 kül içeren örnek |
| ÇKK 300-20 | : 300 dozaj %20 kül içeren örnek |
| ÇKK 400-0 | : 400 dozaj %0 kül içeren örnek |
| ÇKK 200-0 | : 400 dozaj %5 kül içeren örnek |
| ÇKK 200-0 | : 400 dozaj %10 kül içeren örnek |
| ÇKK 400-0 | : 400 dozaj %20 kül içeren örnek |

| | |
|----------------|--|
| BA | : Birim ağırlık |
| R ² | : Korelasyon katsayısı |
| µm | : Mikrometre |
| HCL | : Hidroklorik asit |
| PPM | : Parts per million (Milyonda bir birim) |



TEŞEKKÜR

Yapmış olduğum bu çalışma boyunca beni yönlendiren ve değerli katkılarını hiçbir zaman esirgemeyen ve tüm gücüyle bana destek veren ve çalıőmayı tamamlamamda çok büyük emeği olan danışman hocam Prof. Dr. Can Burak ŐŐŐMAN'a teőekkürlerimi sunarım. Namık Kemal Üniversitesi Biyosistem Mühendisliği Anabilim Dalı ğretim yesi Prof. Dr. İsrail KOCAMAN ve Namık Kemal Üniversitesi İnaaat Mühendisliği Anabilim Dalı ğretim yesi Doç. Dr. Ayőe KOPUZ'a tezin oluőturulması esnasındaki katkılarından ve desteklerinden dolayı teşekkür ederim. Laboratuvar çalıőmalarımnda her zaman desteklerini hissettiğim Biyosistem Mühendisliği Araştırma Görevlisi Dr. Hüseyin Cömert KUR'a teőekkürü bir borç bilirim.

Bugünlere ulaőmamı sağlayan, hiçbir zaman desteklerini benden esirgemeyen merhum babam Mustafa AYDIN, annem Nimet AYDIN, ağabeyim Mehmet Alper AYDIN ve eőim Nesli AYDIN'a sonsuz teşekkür ederim.

Ocak, 2022

Ahmet Taner AYDIN
İnaaat Yüksek Mühendisi

1. GİRİŞ

Barınma; insanoğlunun dünyadaki varlığını sürdürebilmesi için beslenmeyle birlikte karşılamak zorunda olduğu temel gereksinimlerden biridir. Barınma ve ortak yaşam alanları oluşturma gereksinimi, uygarlık tarihindeki önemli gelişmelerin itici gücü olmuştur. İlk çağlardan başlayarak günümüze kadar ilerleyen bu gelişim sürecinde farklı malzemeler ön plana çıkmış ancak en önemli gelişme betonun kullanılmasıyla birlikte yaşanmıştır.

Beton üretimi ve üretimde kullanılan bileşenlerin özellikle de çimento maliyetlerinin zamanla hızlı artış göstermesi beton maliyetlerini de artırmış ve bu maliyeti düşürmek için yeni arayışlar gündeme gelmiştir. Maliyetin düşmesine ek olarak betonun var olan fiziksel ve mekanik özelliklerinin geliştirilmesi konulu çalışmalarda yapılmaya başlanmıştır. Bu kapsamda beton üretiminde çimento miktarını azaltacak ve yerine kullanılabilir puzolanik özellik gösteren doğal veya yapay malzeme arayışları başlamış ve farklı sektörlerin çeşitli atıklarının bu amaçla kullanılabilirliği belirlenmiştir. Amaca uygun fiziksel ve kimyasal özellikleri sağlayan farklı atıklar diğer sektörlerde olduğu gibi beton ve çimento sektörlerinde de kullanılmaya başlamıştır. Atıkların farklı sektörlerde ve üretimlerde ham madde olarak kullanılmasıyla üretim maliyetleri düşürülürken, hava, su ve toprak kaynakları üzerinde önemli kirlilik ve çevresel sorunlar oluşturan bu materyaller bertaraf da edilmektedirler.

Betonda puzolan olarak çimento ikamesi yapılan atık maddeler araştırmacılar tarafından incelenmiş ve uçucu kül, cüruf gibi sanayi atıkları, seramik atıklar, bor atıkları, tarımsal atıklar bu kapsamda araştırılmıştır (Akyıldız, 2012; Demirel ve Nasıroğlu, 2017; Kalınçimen, Öztürk, Kaplan, ve Yıldız, 2015). Kaktüs suyu, ağaç reçineleri gibi maddeler bile bağlayıcılığı artırma olasılığı göz önüne alınarak incelenmiştir (Chandra, Eklund, Villarreal, 1998; Shanmugavel, Selvaraj, Ramadoss, Raneri, 2020). Çimento yerine ikame edilen bu ürünlerin betonun işlenebilirliğini arttırdığı ve uzun dönem dayanımlarına katkı sağladığı gözlemlenmiştir. Fakat çimento yerine kullanılabilir bu malzemelerin doğadaki miktarı da beton üretiminin sürdürülebilir olabilmesi yönünden önemlidir. Örnek olarak, reçine ve kaktüs suyu gibi malzemelerin doğadaki hacimlerinin oldukça düşük seviyede kalması bunların sadece spesifik laboratuvar çalışmalarında kullanılmasına ve bilimsel literatüre teorik olarak katkı sağlaması anlamında önemlidir.

Tarımsal üretimin büyüklüğüne karşın Türkiye’de değerlendirilemeyen çok fazla tarımsal atık bulunmaktadır. Tarımsal atıklar, bitkisel ve hayvansal üretim esnasında veya

sonrasında ürünlerin işlenmesi sonucunda ortaya çıkan genellikle organik kökenli atıklardır. (Çolakoğlu, 2018). İster bitkisel ister hayvansal ister işleme esnasında ortaya çıkan atıklar olsun organik kaynaklı atıkların kontrolsüz bir biçimde bertaraf edilmesi veya depolanmaması durumunda toprak ve su kaynakları gibi doğal kaynakların kirlenmesine, koku ve kirletici gaz oluşumu ile çevresel sorunlara neden olmaktadır. Bu atıkların değerlendirilmesi çevre ve canlı sağlığı ile ülke ekonomisi açısından oldukça önemlidir. Bu bağlamda özellikle inşaat sektöründe kullanılabilecek tarımsal atıklardan bir tanesi de çeltik atıklarıdır.

Çeltik, ülkemizin belirli bölgelerinde tarımı yoğun yapılan ve üretimi her yıl artan bir ürün olup oldukça fazla atık oluşturmaktadır. Ekim alanı, 2002 yılında 60.000 hektar ve hasat edilen ürün miktarı 360.000 ton iken, 2020 yılında ekim alanı 125.398 hektara ve hasat edilen ürün miktarı da 980.000 ton'a ulaşmıştır (Anonim, 2021-b). Bununla birlikte 100 kg çeltiğin işlenmesi sonucu ortalama 55-60 kg pirinç, 7-8 kg kırık pirinç, 8-10 kg pirinç kepeği, 2-3 kg fotosel iadesi, 2-3 kg ham tane ve 15 kg kavuz elde edilmektedir (Anonim, 2017). Bu yaklaşımla 2020 yılı için 980.000 ton çeltikten 147.000-196.000 ton aralığında kavuz elde edildiği bilinmektedir. Ülkemizde çeltik yetiştiriciliğinde; Edirne başta olmak üzere Çorum, Samsun, Sinop, İzmir, Manisa, Balıkesir ve Kastamonu ön plana çıkmaktadır. Bölge bazında ise, üretimin yaklaşık %70'i Marmara Bölgesinde, % 26'sı Karadeniz Bölgesi'nde yapılmaktadır (Çelik ve Emeksiz, 2019).

Çeltik üretiminde ortaya çıkan en önemli atıklardan biriside çeltik kavuzudur. Kavuz, hayvan barınaklarında altlık olarak, kauçuk üretiminde dolgu malzemesi olarak ve çeltik fabrikalarında yakıt olarak kullanılmaktadır. Kavuzun sert ve odunsu yapısı, düşük besin değeri, bozunmaya karşı direnci, fazla miktarda bulunması, yanıcılığının ve kül miktarının yüksek olması biyokütle veya yakıt olarak kullanımını öne çıkarmıştır. Yakıt amacıyla kullanılabilirliğini artırmak amacıyla kavuz öğütülerek daha küçük parçalara ayrılıp yüksek basınçta sıkıştırılarak biyoyakıt biriketi haline getirilmektedir (Kuşkonmaz, 1993). Çeltik kavuzunun yakılması sonucu yaklaşık %20 oranında oluşan küller (Kıvrak, 2012) ise içerdikleri yüksek silika nedeniyle beton sektöründe puzolan olarak kullanılabilecek bir malzemedir.

Bu çalışma, Trakya bölgesinde yoğun olarak yetiştirilen çeltiğin atığı durumundaki kavuzun yanması sonucunda açığa çıkan küllerin beton üretiminde puzolan olarak kullanılabilirliğinin araştırılması ve betonun fiziksel, mekanik ve termal özellikleri üzerine etkilerinin incelenmesi amacıyla yapılmıştır.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Temel olarak beton; agrega (ince ve kaba), çimento ile suyun gerektiğinde kimyasal ve mineral katkı maddeleri ilave edilerek homojen olarak karıştırılmasıyla oluşan, ilk aşamada plastik ve akışkan kıvamda olan, zamanla katılaşıp dayanım kazanan önemli yapı malzemesidir. Bir başka anlatımla beton; insanoğlunun gereksinimlerine cevap verebilecek şekilde suni taşıyıcı olarak üretilmiş bir taş olarak değerlendirilebilir. Betonlar genel olarak; birim ağırlıklarına, basınç dayanımlarına, üretildikleri ve uygulandıkları yere göre farklı şekillerde gruplandırılmaktadır.

Türk Standartları Enstitüsünün TS EN 206-1 (2002) standardına göre betonlar yoğunlukları göz önüne alındığında; hafif, normal ve ağır betonlar olarak sınıflandırılmaktadırlar. Birim hacim ağırlığı (yoğunluğu) 800-2.000 kg/m³ arasında olan betonlara hafif beton denir. Genellikle bu betonlar ses ve ısı yalıtımı ile ölü ağırlığın düşürülmesi ve hafiflik özellikleri aranan yapı elemanlarında kullanılmaktadır. Normal betonlar doğal taneli agrega ile üretilen ve birim ağırlığı 2.000-2.600 kg/m³ arasında değişen betonlardır. Önemli bir ayrıcalık talebi olmayan yapılarda maliyetlerinin düşüklüğü, yüksek dayanımı, kolay işlenebilme özelliklerinden dolayı yoğun şekilde kullanılmaktadır. Ağır betonlar ise özellikle özel bir amaca yönelik olarak üretilen, birim ağırlıkları 2.600 kg/m³ ve üzerinde olan betonlardır.

Basınç dayanımlarına göre betonlar 3 grupta incelenebilmektedir (Mehta ve Monteiro, 2006). Basınç dayanımı; 20 MPa'a kadar olan betonlar düşük dayanımlı, 20MPa-40MPa arasında kalan betonlar orta dayanımlı ve 40 MPa'dan fazla dayanım değerine ulaşan betonlar da yüksek dayanımlı beton sınıfında gruplandırılmaktadır.

Betonlar üretildikleri yere göre sınıflandırıldığında, şantiye sahasında ve santralde üretilen betonlar olmak üzere iki grupta sınıflandırılmaktadır (Bakır, 2011). Beton bileşenlerinin şantiyede karıştırılması sonucu elde edilen betonlar şantiye sahası betonu olup, 5 km'ye kadar bu betondan dağıtım yapılabilir. Betoniyerle veya elle karıştırılan türleri vardır. Günümüzde kullanımı oldukça azdır. Ülkemizde üretilen betonların neredeyse tamamına yakını santralde üretilmektedir. Maliyeti yüksek olmasına karşın; daha homojen karışım ile zaman ve işçilikten tasarruf sağlanması kalite kontrolünün rahatlıkla yapılması gibi üstünlükleri nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır (Demirkollu, 2021).

Betonların uygulandıkları yere göre farklı özel beton türleri kullanılmaktadır. Bu betonlardan bazıları; püskürtme, lifli, vakumlu ve vizko betonlardır Püskürtülerek yerleştirilen ve aynı zamanda püskürtme etkisiyle sıkıştırılmış betonlar püskürtme betonlardır. Bu beton, basınca dayanıklı lastik veya özel yapımlı boğumlu sac borular vasıtasıyla kullanılacağı yere aktarılmakta ve buradan yüzeye püskürtülerek uygulaması tamamlanmaktadır. Lifli beton; çimento, agrega ve çoğunlukla süreksiz dağılmış liflerin su ile karıştırılmasıyla oluşan beton olarak tanımlanmaktadır. Özellikle yüksek dayanım gerektiren durumlarda sağladığı üstünlükler bakımından lifli betonların önemi hızla artmaktadır Vakumlu betonlar; betonda yeterli yüksek işlenebilirlik ve minimum su/çimento oranının birlikte temin edilmesi amacıyla yerleştirme işleminden sonra taze betona vakum uygulaması yapılmasıdır. Genellikle geniş alanlarda (hava alanı, endüstriyel döşeme, akaryakıt istasyonlarında ve karayolu) dökülen taze betona uygulanmaktadır. Kendiliğinden Yerleşen Beton olarak da adlandırılan bu betonlar vibratör kullanmadan kalıba yerleşebilmekte olup vizkobeton olarak anılmaktadır. Çimento oranı yüksek su oranı düşük olan bu beton içine katılan süper akışkanlaştırıcılar sayesinde kendiliğinden yerleşen akış gücü yüksek bir beton halini almaktadır (Demirkollu, 2021).

2.1. Beton Bileşenleri

2.1.1. Çimento

Çimento, beton bileşenlerini bir arada tutan ve dayanım kazanmalarına sebep olan bağlayıcı bir malzemedir. İlk olarak 1824 yılında İngiltere'nin Leeds şehrindeki duvar ustası Joseph Aspdin, kireçtaşı ve kilin fırında yakılmasıyla hidrolik bağlayıcılık özelliği olan ve Portland Çimentosu adını verdiği bu malzemenin patentini almıştır (Erdoğan ve Erdoğan, 2010). O dönemde çimento üretiminde çok büyük bir ilerleme kaydedilmemiş, ancak 1850'li yıllarda kullanımı hızlı şekilde artarak İngiltere dışında Almanya ve Belçika'da da yaygınlaşmıştır. Amerika Birleşik Devletleri'ne çimento gönderimi 1868'de başlamış ve 1895'te tepe noktasına ulaşmıştır (Köseoğlu, Üzüm ve Çakır, 2015).

Çimento, ana hammaddesi kalker ve kil olan ve su ile birleştiğinde mineral parçaları bağlayıcılık özelliği olan bir malzemedir. Çimento, kırılmış kalker, kil, gerektiğinde demir cevheri ve kum katılarak öğütülüp, 1400-1500°C'da pişirilerek elde edilen klinkere yaklaşık %4-5 oranında alçı taşı eklenip, çok ince toz halinde öğütülmesiyle üretilmektedir (Pelletier, Winnefeld ve Lothenbach, 2010; Şimşek, Şimşek ve Altunok, 2013).

Çimentolar TS EN 197-1 (2012) standardına göre, Portland Çimentosu (CEM I), Portland Kompoze Çimentosu (CEM II), Portland Yüksek Fırın Cürüflu Çimento (CEM III), Puzolonik Çimento (CEM IV) ve Kompoze Çimento (CEM V) olmak üzere 5 grupta sınıflandırılmaktadır (Çizelge 2.1).

Çimentolar TS EN 197-1 (2012) standardına belirtildiği gibi 28 günlük basınç dayanımlarına göre 32,5, 42,5 ve 52,5 olmak üzere 3 sınıfa ayrılmaktadır.

Standartlarda belirtilen bu çimentoların dışında, farklı amaçlara yönelik olarak beyaz çimento, kalsiyum alüminalı çimento, süper sülfat çimento, ince taneli çimento, kendini temizleyen çimento, hidrofob çimento ve anti-bakteriyel çimento gibi özel çimentolar da üretilmektedir.

Beyaz çimento görünümünün önemli olduğu dekoratif yapı elemanlarında kullanılmaktadır. Hem dekoratif görünümü hem de içeriğine ilave edilen %0,15 demir sayesinde iyileştirilen yük taşıma kapasitesi nedeniyle günümüzde dekoratif ve sanatsal mimari tasarımlarda, hazır sıva, harç, yer ve duvar kaplamalarında, brüt beton ve hazır beton üretimlerinde yeğlenmektedir (Cassar, Pepe, Tognon, Guerrini ve Amadelli, 2003; Uysal, Mercan ve Sümer, 2011). Normal gri çimentoya oranla içeriğinde daha az demir-oksit ve mangan kullanılan beyaz çimentonun pişme sıcaklığı gri çimentoya göre daha yüksektir (Engin, 2015).

Kalsiyum alüminalı çimento özellikle yüksek performans gerektiren uygulamalarda kullanılmaktadır. Kimyasal saldırılara karşı direnç gerektiren, yüksek erken dayanım istenen aşınmaya dirençli imalatlarda tercih edilen çimento çeşididir. İlk 24 saat içinde hidrasyondaki toplam ısıнын %70-90'lık kısmı ortaya çıkmaktadır (Ukrainczyk ve Matusinovic, 2010). Bu çimento normal çimentoya kıyasla oldukça pahalıdır. Bu yüzden yüksek performansa gereksinim duyulan ve geleneksel çimentoyla çözülmesi zor olan uygulamalarda tercih edilmektedir. Kullanım alanları arasında sülfürik asitlerin sorun oluşturduğu kanalizasyon şebekeleri, aşınmaya karşı direncin kritik düzeylerde olduğu barajlar yer almaktadır (Scrivener, Cabiron ve Letourneux, 1999).

Çizelge 2.1. TS EN 197-1 Çimento çeşitleri

| Çimento Tipi | Adı | Notasyon | Klinker Oranı (%) | Ana Bileşen (%)* | Minör İlave Bileşenler (%) |
|--------------------------|--------------------------------|-------------|--------------------------|---------------------|----------------------------|
| CEM I | Portland Çimento | CEM I | 95-100 | - | 0-5 |
| CEM II | Portland Cürüflu Çimento | CEM II/A-S | 80-94 | 6-20 S | 0-5 |
| | | CEM II/B-S | 65-79 | 21-35 S | 0-5 |
| | Portland Silis Dumanlı Çimento | CEM II/A-D | 90-94 | 6-10 D | 0-5 |
| | Portland Puzolanlı Çimento | CEM II/A-P | 80-94 | 6-20 P | 0-5 |
| | | CEM II/B-P | 65-79 | 21-35 P | 0-5 |
| | | CEM II/A-Q | 80-94 | 6-20 Q | 0-5 |
| | | CEM II/B-Q | 65-79 | 21-35 Q | 0-5 |
| | Portland Uçucu Küllü Çimento | CEM II/A-V | 80-94 | 6-20 V | 0-5 |
| | | CEM II/B-V | 65-79 | 21-35 V | 0-5 |
| | | CEM II/A-W | 80-94 | 6-20 W | 0-5 |
| | Portland Pişmiş Şistli Çimento | CEM II/B-W | 65-79 | 21-35 W | 0-5 |
| | | CEM II/A-T | 80-94 | 6-20 T | 0-5 |
| | | CEM II/B-T | 65-79 | 21-35 T | 0-5 |
| | Portland Kalkerli Çimento | CEM II/A-L | 80-94 | 6-20 L | 0-5 |
| | | CEM II/B-L | 65-79 | 21-35 L | 0-5 |
| | | CEM II/A-LL | 80-94 | 6-20 LL | 0-5 |
| CEM II/B-LL | | 65-79 | 21-35 LL | 0-5 | |
| Portland Kompoze Çimento | CEM II/A-M | 80-94 | 6-20 S-D-P-Q-V-W-T-L-LL | 0-5 | |
| | CEM II/B-M | 65-79 | 21-35 S-D-P-Q-V-W-T-L-LL | 0-5 | |
| CEM III | Yüksek Fırın Cürüflu Çimento | CEM III/A | 35-64 | 36-65 S | 0-5 |
| | | CEM III/B | 20-34 | 66-80 S | 0-5 |
| | | CEM III/C | 5-19 | 81-95 S | |
| CEM IV | Puzolanik Çimento | CEM IV/A | 65-89 | 11-35 D-P-Q-V-W | 0-5 |
| | | CEM IV/B | 45-64 | 36-55 D-P-Q-V-W | 0-5 |
| CEM V | Kompoze Çimento | CEM V/A | 40-64 | 18-30 S 18-30 P-Q-V | 0-5 |
| | | CEM V/B | 20-38 | 31-49 S 31-49 P-Q-V | 0-5 |

*S: Yüksek Fırın Cürüflu, D: Silisi Dumanı, P: Doğal Puzolan, Q: Endüstriyel Puzolan, V: Silisli Uçucu Kül, W: Kalkersi Uçucu Kül, T: Pişmiş Şist, L: Kalker (Kireç Taşı), LL: Kalker (Kireç Taşı)

Geleneksel Portland Çimentosu yüksek enerji tüketimi ve karbondioksit emisyonları sebebiyle daha çevreci bir çimento üretme gereksinimi sonucunda süper sülfat çimento üretilmiştir. Küresel olarak toplam karbondioksit emisyonlarının yaklaşık %7-10'luk kısmı çimento üretimi esnasında ortaya çıkmaktadır. Bu oranı azaltmak amacıyla ilk olarak 1908 yılında Alman Kühl tarafından, süper sülfat çimento geliştirilmiştir. İçeriğinde esas olarak çelik cürufu ve atık alçı kullanılmaktadır (Zhou, Peng, Chen, Huang ve Ma, 2021). Özellikle sülfat varlığının bulunduğu ortamlarda süper sülfat çimento yeğlenmektedir. Alternatif olarak normal çimentoya yüksek fırın cürufu, silis dumanı, uçucu kül gibi katkıları sağlanarak betonun durabilitesi sağlanabilmektedir (Gündeşli, 2008).

İnce çimento, Blain değeri 6000 ve üzerinde olan oldukça ince taneli çimentodur (Engin, 2015). Genellikle kimyasal etkilere maruz ve beton durabilitesinin korunmasının gerektiği uygulamalarda, toprak ve kaya kütlelerini güçlendirmek için harç püskürtmek yapılan enjeksiyonlarda yaygın olarak kullanılmaktadır (Tian, Han ve Meng, 2020).

Kendini temizleyen çimento oldukça yenilikçi bir kavramdır. Son yıllarda geliştirilen bu çimento beton yüzeylerin kendi kendini temizleme kabiliyetini artırmak ve açık renkleri daha uzun süre korumak için başta nitrojen-oksit olmak üzere havadaki toksinleri yüzeyden uzak tutmak amacıyla içeriğine TiO_2 katılan bir çimentodur (Mircea, 2019).

Hidrofob çimento üretilirken klinkere hidrofob bir eleman (%0,1-0,4 stearik asit, oleic asit) eklenmesinden sonra öğütülmesi sonucu elde edilen ve neme karşı dayanım gerektiren alanlarda kullanılan bir çimentodur (Engin, 2015).

Anti-bakteriyel çimento betonda oluşabilecek mikrobiyolojik aktiviteyi önlemek için içinde anti-bakteriyel maddeler bulunan portland çimentosudur. Bu çimento, gıda maddesi üreten tesislerin yer betonlarında, su depoları, yüzme havuzlarında ve bakteri, mantar oluşması muhtemel olan uygulamalarda da kullanılmaktadır (Engin, 2015).

2.1.2. Agregalar

Betonda bulunan kum, çakıl, kırma taş gibi malzemelerin genel adına agregalar adı verilmektedir. Beton içinde hacimsel olarak en çok yer kaplayan ve elde edilen betonun toplam hacminin yaklaşık %60-75'ini oluşturan kısımdır. Agregalar genel olarak ince agregalar ve kaba agregalar olmak üzere iki sınıftır. Tane çapı 4 mm'den küçük olan agregalar ince, büyük olanlar

ise iri agrega olarak tanımlanmaktadır (Özbebek ve Açık (2011); TS 706 EN 12620+A1 (2009)).

İyi bir agreganın sert ve dayanıklı olması, dayanımı düşük, zayıf ve yassı-uzun taneler içermemesi gerekmektedir. Betonda kullanılacak agregaların uygunluğu elek analizi, yassılık ve su emme kapasiteleri değerlendirilerek belirlenmektedir. Betonda kullanılacak agregaların yüksek dayanımlı olması betonun da yüksek dayanımda olmasına katkı sağlamaktadır. Agregaların tane boyutu, birim ağırlığı, su emme değeri, tanelerin şekil yapısı ve toplam agregada bulunan agregaların boyut dağılımı, aşınmaya dayanım, dona dayanım gibi parametreler beton üretiminde göz önüne alınması gereken önemli parametreler arasındadır (TS 706 EN 12620+A1 (2009)).

Son yıllarda malzeme teknolojisinin gelişmesiyle yapı elemanlarının boyutlarında küçültmeler sağlanmış ve daha hafif yapılar üretilmiştir. Özellikle taşıyıcı olmayan yapı elemanlarında eskiden yapıldığı gibi kalın yapı elemanlarının yerini daha ince imalatlar almıştır. Diğer taraftan bu değişim yapıda ısı, ses ve nem ile ilgili bazı bozulmalara yol açmıştır. Doğal kaynakların hızla azaldığı günümüzde bu durum amacına uygun malzeme üretilebilmesi için alternatif arayışları ve çeşitliliği artırma gereksinimini oluşturmuştur (Çelik ve Gürdal, 2010). Bitkilerden elde edilen farklı atıklar diğer yapı malzemeleriyle birlikte kullanılarak hem ekonomik bir değer oluşturulabilmekte, hem de atık malzemelerin çevreye verdiği olumsuz etkiler azaltılabilmektedir.

Yer fıstığı kabuğunun farklı yüzdelerde ince agrega olarak kullanıldığı bir çalışmada (Sada, Amartey ve Bakoc, 2013), %25 ve üzerinde kabuk kullanılarak üretilen betonların düşük gerilme gerektiren elemanlarda hafif beton olarak kullanılabileceği belirlenmiştir.

Palm kabuklarının agrega olarak kullanıldığı bir başka çalışmada (Mannan ve Ganapathy, 2004), yoğunluklarının agregaya oranla düşük olması nedeniyle yeterli dayanım özelliğine sahip ve ekonomik hafif beton üretilebileceği belirlenmiştir. Benzer bir çalışmada (Teo, Mannan ve Kurian, 2006), palm kabuklarının agrega olarak kullanıldığı ve basınç dayanımı, aderans, elastisite modülü, kırılma dayanımı gibi mekanik özelliklerinin araştırıldığı çalışmada, üretilen betonların hafifliği ve yeterli dayanım özellikleri nedeniyle özellikle deprem bölgelerinde yapı yükünü azaltmak için düşük maliyetli konutlarda kullanılabileceği önerilmiştir.

Pinto vd. (2012) agrega olarak granüle mısır koçanı kullandıkları bir deneysel çalışmada, mısır koçanının basınç dayanımını olumsuz etkilediğini belirlemesine karşın, yoğunluk ve termal özellikleri iyileştirdiğini ve bu nedenle yapısal olmayan hafif beton uygulamalarında rahatlıkla kullanılabileceğini ifade etmişlerdir.

Ayçiçek saplarının agrega yerine kullanıldığı bir başka araştırmada (Helepciuc, Barbuta ve Serbanoiu, 2018), 3 farklı varyasyonda üretilen hafif betonlar geleneksel yöntemle üretilen betonlarla karşılaştırılmıştır. Karışımda agrega yerine %50 sap kullanılmasının betonun mekanik özelliklerini olumsuz etkilediği gözlemlenmiştir. Ancak, ayçiçek sapı kullanılan agregaların silikat çözeltileri ile reaksiyonu, daha iyi sonuçlar verdiği için, betonun basınç ve çekme dayanımlarında önemli gelişmelere neden olduğu belirlenmiştir.

Benzer şekilde Gradinaru, Serbanoiu ve Muntean (2020) betonda kum yerine farklı oranlarda ayçiçek sapı kullanılması üzerine yaptıkları çalışmada, üretilen mikro betonların mekanik dayanım özelliklerinin azaldığı belirlenmiş olsa da, %20-35 oranlarında ayçiçek sapı kullanılan örneklerde çekme dayanımında iyileşmeler gözlemlenmiştir. Çalışmanın en önemli çıktısı, üretilen betonların birim ağırlıklarının 822 kg/m^3 'e kadar düşürülmesi ve bu betonların yapısal amaçlı hafif beton olarak kullanılabilir olmasındır.

Tarımsal yapılarda ayçiçek sapı ile üretilen betonların kullanılabilirliğinin araştırıldığı diğer bir çalışmada, agrega hacminin %40'ına kadar ayçiçek sapı kullanılarak 300 ve 400 dozlu üretilen beton örnekleri üretilmiştir. Çalışma sonucunda, karışıma giren ayçiçek miktarı ile birim ağırlık ve basınç dayanımının ters orantı olarak azaldığı, su emme oranlarının ise arttığı belirlenmiş, karışıma giren sap miktarının %30'un üzerinde olması durumunda üretilen betonların hafif beton olarak sınıflandırılabilirliği ifade edilmiştir. Ayrıca 300 dozajlı ve %20 ayçiçeği sapı kullanılan betonlar ile 400 dozajlı %30 ikameli betonların yapısal beton olarak kullanılabilirliği de belirtilmiştir (Şişman ve Alkaya, 2019).

Yine tarımsal yapılarda çeltik kavuzunun farklı yüzdelerde normal agrega içine eklenmesiyle üretilen 300 dozluk betonlarda termal iletkenlik katsayısının 1,53 ile 0,79 W/mK arasında değişmekte olduğu raporlanmış ve çeltik kavuzunun üretilen hafif betonların ısı iletimlerinin, normal betona kıyasla yaklaşık olarak iki kat daha düşük olduğu bildirilmiştir. Bununla beraber örneklerin basınç dayanımları ve birim ağırlıklarının sırasıyla 17,6 MPa ile 37,5 MPa ve 1797 kg/m^3 ile 2268 kg/m^3 arasında olduğu belirtilmiş ÇKK'nin tarımsal yapılarda

kullanılan hafif betonların üretiminde potansiyel bir malzeme olabileceği bildirilmiştir (Şişman, Gezer ve Kocaman, 2011).

Betonun ses ve akustik özelliklerini iyileştirmek amacıyla yapılan çalışmada, polistiren granülleri, polietilen granülleri, mısır koçanı granülleri, parçalamış ayçiçek sapları ve koyun yününden top haline getirilmiş malzemeler kullanılarak 40 mm ve 80 mm kalınlıkta beton paneller üretilmiştir. Örneklerin akustik absorbe katsayıları belirlenmiştir. Çalışma sonucunda, tüm katkı malzemelerinin akustik performansları geleneksel betondan daha iyi sonuçlar vermiş ve gürültü kirliliğini azaltmak için sürdürülebilir bir çözüm olması adına bu atık malzemelerin kullanılabilirliği önerilmiştir. (Oancea, Bujoreanu, Budescu, Benchea ve Grădinaru, 2018).

Vaickelionis ve Valanciene (2016), buğday kabuğunun kum yerine ve buğday kabuğu özünü çimento yerine kullandıkları bir çalışmada buğday kabuğunun, çok fazla mukavemet gereksinimi olmayan hafif beton, panel ve duvar bloklarda oldukça makul bir maliyetle agrega olarak kullanılabilirliğini bildirmiştir.

2.1.3. Su

Beton üretiminde kullanılan su, betonun sertleşmesini sağlayan hidrasyon için gereklidir. Genel olarak bakıldığında içilebilecek nitelikteki su betonda kullanılabilir (Sarıkaya, 2006).

Betonda suyun genel olarak iki fonksiyonu vardır. Bunlardan ilki hidrasyonu sağlamak ikincisi ise agreganın ıslatılmasıyla beraber betonun yerleştirilmesi için gerekli olan işlenebilirliği temin etmektir. Suyun fazla miktarda kullanılması betonda ayrışma olarak bilinen segregasyona yol açtığı gibi, hidrasyon sonrasında betonun sertleşmesinden sonra beton bünyesinde kalan suyun buharlaşarak betonda boşluklu bir yapının oluşmasına neden olur, bu da betonun basınç dayanımında kayıplara sebep olmaktadır. Bu nedenle betonda kullanılacak suyun en optimum düzeyde kullanılması gerekmektedir (Ekmekyapar ve Örüng, 1993).

Beton hazırlanmasında kullanılan suyun kalitesi beton kalitesinde önemli rol oynar. Su muhtevası, çimentonun sertleşmesiyle birlikte betonun dayanımını ve dayanıklılığını da olumsuz etkileyebilmektedir. Suda bulunabilen kimyasal bileşenler, kimyasal reaksiyonlara aktif olarak katılabilmekte ve bunun sonucunda betonun sertleşme, mukavemet gelişimi ve donma çözünme performanslarında olumsuz bir etki oluşturabilmektedir (Kucche, Jamkar ve Sadgir, 2015). Betona etki etmesi olası olumsuz kimyasal etkileri gidermek için suda bulunan

sülfat miktarı 2000 mg/l't'i, alkali-slika reaksiyonuna karşı özel önlem alınmadığı zamanlarda alkali miktarının 1500 mg/l't'i geçmemesi istenmektedir (TS EN 1008, 2013).

2.1.4. Puzolanlar

Puzolan kavramı, Güney İtalya'da Napoli Körfezi'nde yer alan Pozzuoli kentinden adını almaktadır (Akan, 2019; Kıvrak, 2012). Puzolan malzemeler kendi başlarına bağlayıcılık özelliği olmayan veya çok az bağlayıcılık gösterebilen, fakat ince taneli öğütüldüklerinde ve suyla birleştiklerinde bağlayıcılık özelliği kazanan malzemelerdir. Puzolan malzemelerin harç ve beton üretiminde kullanılması MÖ 300 yıllarına kadar gitmektedir. Puzolan malzemelerin bağlayıcılık özelliklerini fark eden Romalı mimar Vitruvius Polio volkanik külü, söndürülmüş kireç ve suyla karıştırıp bu hamurun içine kırık taş parçaları ilave ederek kullanıp günümüzdeki betona benzer malzeme üretmiştir (Erdoğan ve Erdoğan, 2007).

Bilim insanlarının, Konya-Çatalhöyük Neolitik çağa ait yapılar üzerinde yaptıkları çalışmalarda, bu yapılarda kullanılan harçların 8000 yıllık olduğu belirlenmiştir (Erdoğan ve Erdoğan, 2005). Benzer şekilde, günümüzden 3000-4000 yıl önce inşa edilen yapıların su yapıları ve mozaik işlerinin hala varlığını koruduğu göz önüne alındığında bu yapılarda puzolan ve sönmüş kirecin kullanıldığı söylenebilmektedir (Malinowski, 1979). Osmanlılar döneminde kullanılan puzolan bir malzeme de Horasan harcı olarak isimlendirilen kil bazlı tuğla, kiremit parçalarının ince taneli öğütülüp sönmüş kireçle karıştırıldıktan sonra suyla yoğrulması ve şekil verilmesiyle üretilen malzemedir (Erdoğan ve Erdoğan, 2007).

Portland çimentosunun 1800'lü yıllarının başında üretildikten sonra puzolanların çimentoya katkı olarak kullanılması gündeme gelmiş ve 1900'lü yıllardan itibaren ince öğütülmüş puzolanlar beton içinde çimentoyla beraber kullanılmaya başlanmıştır. Amerika Birleşik Devletleri, Almanya, İtalya, Brezilya gibi ülkelerde farklı puzolanlar kullanılarak başta barajlar olmak üzere büyük projeler hayata geçirilmiştir (Erdoğan ve Erdoğan, 2007).

Günümüz inşaat sektöründe bağlayıcı olarak en çok kullanılan malzeme olan çimentonun üretimi oldukça zor ve yüksek maliyetli bir süreçtir. Üretim prosesi içerisinde özellikle klinkerin pişirilmesi ve öğütülmesi büyük miktarlarda enerji gerektirmektedir. Bu enerjinin sağlanması için kullanılan kaynak ve yöntemler ise önemli çevresel sorunlara neden olmaktadır. Dolayısıyla çimentonun üretiminden kaynaklanan ekonomik ve çevresel sorunların

azaltılabilmesi için betonda çimentonun yerine veya bir kısmının yerine kullanılabilir, çimentoya alternatif malzemelerin geliştirilmesi gerekmektedir (Ceylan ve Davraz, 2013).

Puzolanların beton oluşumu esnasındaki fonksiyonu incelendiğinde; çimentoda bulunan kalsiyum silikatlı bileşenlerin su ile bir araya gelmesi ve hidrasyonu ile kalsiyum silika hidrat (CSH Jelleri) ürünleri ortaya çıkarken, tane boyutu oldukça ince olan puzolanlar portland çimentosunun hidrasyonu ile ortaya çıkan kalsiyum hidroksit ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ile reaksiyona girerek ilave ve yeni kalsiyum silika hidrat ürünlerinin oluşmasına sebep olmaktadır (Erdoğan ve Erdoğan, 2007; Kurugöl ve Güleç, 2017). Puzolanik aktivite ise suyun bulunduğu ortamda puzolanların kireçle reaksiyona girmesiyle oluşan bağlanma kabiliyeti olarak açıklanabilmektedir (Erdoğan, 2003). Puzolanik aktivite hızı kimyasal bileşim, faz içeriği gibi puzolana ait teknik özelliklere bağlı olarak değişmektedir (Ceylan, 2020).

Puzolanlar betonda direk katkı maddesi olarak kullanıldığı gibi çimento üretiminde de kullanılmaktadır. Betonda kullanılan puzolanların ekonomik ve çevreci üstünlükleri dışında; terlemeyi, segregasyonu, hidrasyonu ısısını, betonun su geçirgenliğini, alkali agrega reaksiyonunu azaltma, işlenebilirliği ve sülfat ataklarına karşı direnci artırma gibi teknik anlamda olumlu yönleri bulunmaktadır (Gündeşli, 2008). Puzolanik özelliğe sahip olan maddeler, teknolojinin gelişmesiyle birlikte betonun kimyasal, mekanik ve durabilite özelliklerini daha iyi hale getirmek için kullanılmaktadır. Bazı puzolanlar da, zemin mekaniği alanında iyileştirme amacıyla katkı maddesi olarak kullanılabilir (Alkaya, 2009).

Bir malzemenin puzolan malzeme olarak kullanılabilmesi için; atomları kararlı olmayan amorf yapıya sahip olmalı, çimento inceliğinde olmalı, yapısında yüksek miktarda silika ve alümina bulundurmalı, bileşimindeki SiO_2 , Al_2O_3 ve Fe_2O_3 miktarının en az %70 olmalıdır (Erdoğan ve Erdoğan, 2007).

Beton üretiminde çimento yerine doğal veya yapay puzolan kullanımı üzerine yapılan birçok çalışmada ağırlık yüzdesi olarak puzolan kullanım oranının %5 - 50 arasında değiştiği görülmektedir. Ancak yürütülen çalışmalarda perlit, atık kül gibi doğal veya yapay puzolan kullanım oranlarının ağırlıklı olarak %20-30 arasında alındığı gözlemlenmektedir (Kaya, 2019; Mouli ve Khelafi, 2008; Omrane ve Rabehi, 2020).

Puzolanların betonda kullanılmasının etkileri şu şekilde özetlenebilir;

- Puzolan katkılı betonlarda, çimento yerine kullanılan ince taneli puzolanın özgül ağırlığı çimentodan daha az olduğu için, daha fazla bağlayıcı hamur elde edilmektedir. Bağlayıcı madde miktarının artması ve görece olarak daha fazla ince malzeme kullanılması beton içindeki ince agreganın hareket kabiliyetini artırmakta ve betonun işlenebilirliği üzerine olumlu etki yapmaktadır (Erdoğan ve Erdoğan, 2007).

- Beton karışımı içerisine giren ince taneli puzolan taze betondaki suyu kendisine iyi bağlayarak taze betondaki terlemeyi azaltmaktadır (Erdoğan ve Erdoğan, 2007).

- Puzolan katkılı betonlarda daha az miktarda çimento kullanıldığı için, betonda alkali ve trikalsiyum aluminat bileşenleri azalmakta ve beton sülfata daha dayanıklı olmaktadır. Bu ise betonda olası alkali agrega reaksiyonunun oluşturacağı genleşme sorununu önlemektedir (Sersale ve Prigione, 1987).

- İnce taneli puzolanlar betondaki boşlukları daha iyi dolduracağından betonun su geçirimsizliğini artırmaktadır (Li ve Roy, 1986).

- Çimentonun hidratasyonu sonucu ortaya çıkan hidratasyon ısısı nedeniyle oluşan rötreye, puzolan kullanımıyla azalan çimento miktarı ve hidratasyon ısısı sonucunda azalmaktadır. Böylece özellikle baraj gibi kütle betonlarının dökümünde hem basınç dayanımına hem de geçirimsizliğe önemli katkı sağlanmaktadır (Fu, Wang, Huang, Hou ve Hou, 2003).

- Her ne kadar puzolanlar betonun ilk dayanımında olumlu katkı sağlayamasa da, sonradan oluşan CSH jelleriyle betonun nihai dayanımına olumlu katkıları bulunmaktadır (Chindaprasirt, Homwuttiwong ve Sirivivatnanon, 2004).

- Puzolan olarak kullanılan malzemeler çimentoya kıyasla ekonomik olarak daha değersiz olduklarından betonun maliyetine olumlu katkılar sağlamaktadır (Worrell, Martin ve Price, 2000).

- Puzolanların birçoğunun doğada atık olarak bulunmasıyla beraber bu malzemelerin beton içinde kullanılarak bertaraf edilmesi daha yaşanılabilir ve daha temiz çevre için de önem taşımaktadır.

Puzolanlar oluşum şekilleri dikkate alınarak genel olarak doğal ve yapay olmak üzere iki grupta incelenmektedir (Aghabaglou, Özen, Bayqra ve Ouedraogo, 2018; Ceylan, 2020; Özcan ve Güngör, 2019; Yılmaz, Erçikdi ve Cihangir, 2017).

2.1.4.1. Doğal Puzolanlar

Doğal puzolanlar, doğada bulunan volkanik orjinli puzolanik özelliği olan kayaçlardır. Ülkemizde “tras” olarak bilinmektedirler (Koçak, 2010). TS standardında doğal puzolanların reaktif silis miktarının en az %25 olması gerektiği belirtilmiştir (TS EN 197-1, 2012).

- **Volkanik Tüf:** Doğal puzolan sınıfındaki en yaygın olan volkanik tüflerdir. İçeriğinde silisli ve alüminli bileşik bulunmaktadır ve ani soğumayla birlikte camsı yapıya dönüşmüşlerdir. Amorf yapıda olmaları ve yüzey alanlarındaki genişlik sayesinde, Ca iyonlarıyla reaksiyona girebilmektedirler (Erdoğan, Tokyay ve Türker, 1999). Volkanik tüfler, volkanik camlar ve volkanik küller en yaygın volkanik kökenli puzolanlardır (Erdoğan, 2003).

- **Zeolit:** Zeolitik tüfler, Roma döneminden bu zamana kadar kireç taşıyla karıştırılarak yapı imalatlarında kullanılmıştır (Perraki, Kontori, Tsvilis ve Kakali, 2010). Son dönemlerde hafif agrega ve çimento katkı maddesi olarak kullanılmaktadır (Aruntağ ve Beycioğlu, 2014). Zeolit bazlı puzolanlar, suya maruz kalacak hidrolik çimentolarda daha yüksek etkinlik göstermektedir. Bunun sebebi olarak; yüksek silis içerdikleri için betonun sertleşme sürecinde açığa çıkan kirecin nötrleşmesinde aktif rol oynamaları gösterilebilir (Turanlı, Yücel, Güncüoğlu, Çulfaz ve Uzal, 2007).

- **Kireçtaşı:** Taş ocaklarında oluşan ve depolama alanlarına atılarak çeşitli çevre ve sağlık sorunlara neden olan kireçtaşı tozları, puzolan olarak kullanılmaktadır (Felekoğlu, 2007).

Kendiliğinden yerleşen betonun yaygın olarak kullanılmaya başlamasından sonra, dayanıma etkisi çok olmamasına karşın iyi bir dolgu malzemesi olması ve maliyeti düşürmesi nedeniyle kireçtaşı beton üretiminde puzolan olarak kullanımı artan bir malzeme olmuştur (Şahmaran, Christianto ve Yaman, 2006). Bununla birlikte kireçtaşının ana bileşeni olan CaCO_3 , C_3S hidratasyonunu hızlandırdığı için betonun erken dayanımına olumlu etkileri gözlemlenmiştir (Bonavetti, Donza, Menendez, Cabrera ve Irassar, 2003; Pera, Husson ve Guilhot, 1999).

Kireçtaşı ilavesiyle üretilen çimentolar kullanılarak yapılan harçlarda hacim artışında kayda değer değişim olmadığı gözlemlenirken, harçta bulunan kireçtaşı miktarının artmasıyla su emme miktarının da arttığı gözlemlenmiştir (Akan, 2019; Pandey, Singh, Sharma, ve Tiwari, 2003). İnce prefabrik betonlar üzerine odaklanan diğer çalışmada, kireçtaşı tozu ile çimento %0, %9, %16, %23 ve %30 oranlarında ikame edilmiş ve betonun özelliklerini önemli ölçüde etkilediği belirlenmiştir. Ayrıca dayanıklılık parametrelerinin mekanik özelliklerden daha fazla

etkilendiği görülmüş ve su emme oranının standartlara uygun kalabilmesi için çimento yerine %11'e kadar kireçtaşı tozu kullanılabilceği raporlanmıştır (Souza, Barbosa, Riccio ve Santos, 2020).

- **Diatomitli Toprak ve Pişirilmiş Kil:** Mikroskopik boyutlardaki silisli alglerin kalıntılarını içeren diatomlu topraklar doğal puzolandır (Xu, Wang, Ma, Zhao ve Zhang, 2014).

Taşıyıcı ve hafif betonların üretiminde kullanılabilen diatomit, yoğun fotosentezin gerçekleştiği sığ sularda (0-35m) yaşayan tek hücreli canlı olan Daitome kabuğunun, kum, kil, kül ve organik maddelerle karışması sonucu oluşmuş sedimantasyon kayacıdır. Diatomit beyaz ve açık renkli tortul bir kayadır (Cong, Chen ve Chen, 2012; Posi, Lertnimoolchai, Sata ve Chindaprasirt, 2013).

Değirmenci ve Yılmaz (2009), çimento yerine %5 diatomit ikamesinin basınç dayanımı açısından standartlarda belirtilen yeterliliğe sahip olduğunu belirlemişlerdir. Diğer taraftan Fragoulis, Stamatakis, Papageorgiou ve Chaniotakis (2005) diatomit kaya tanelerini kullandıkları çalışmada, basınç dayanımında artış olduğunu belirtmişlerdir. Benzer şekilde farklı granülometrideki agregalar kullanarak diatomit içeren çimento ile üretilen beton blokların fiziksel ve mekanik özelliklerinin incelendiği araştırmada, diatomit içeren hafif agregalı betonların düşük ısı iletkenliği nedeniyle yüksek izolasyona gereksinim duyulan yapılarda kullanılabilceği ifade edilmiştir (Ünal, Uygunoğlu ve Yıldız, 2007).

Pişirilmiş killer doğal puzolan sınıfında yer almaktadır. Kilde yeterli miktarda silika ve alümina olmasına karşın, pişirilmediklerinde sahip oldukları minerallerin kristal yapıya sahip olmaları nedeniyle bağlayıcılık özelliğini göstermemektedirler. Ancak kil pişirildiğinde bu kristalize yapı bozularak amorf haline gelmekte ve ince öğütülmeleri durumunda bağlayıcılık özelliği kazanmaktadırlar (Daştan, 2005). Kurugöl (2015) yaptığı çalışmada, farklı sıcaklık derecelerinde pişirilen kil ile üretilen harçların puzolanik ve mekanik özellikleri ile ultra ses hızları arasında anlamlı ilişki bulmuştur.

2.1.4.2. Yapay Puzolanlar

Yapay puzolanlar, endüstriyel bir imalat gerçekleştirilirken yan ürün olarak ortaya çıkan silis ve alümin bazlı puzolanik özellik gösteren malzemelerdir. Bilinen yapay puzolanlar, uçucu kül, silis dumanı ve yüksek fırın cürufudur (Topçu ve Sofuoğlu, 2020).

- **Uçucu Kül:** Kömürle enerji üretimi yapan termik santrallerde yakılan kömürden ve demir ve çelik üretimi yapan tesislerden atık veya yan ürün olarak ortaya çıkmaktadır (Alkaya, 2009). Dünyada olduğu gibi ülkemizde de yüksek olan enerji talebini karşılamak için genellikle düşük kalorili kül oranı yüksek kömür kullanılmakta ve bunun sonucunda ise çok miktarda uçucu kül oluşmaktadır (Demiröz, 2009).

Uçucu küllerin puzolanik aktivitesi yapısında bulunan silika, alümin ve su miktarına, karışımdaki serbest kireç varlığı ile tane boyutuna yani inceliğine bağlıdır (Taş, Fidan ve Yılmaz, 2018). Yapılan bir çalışmada, ince taneli uçucu küllerin boşlukları doldurma ve kayganlık/işlenebilirlik kabiliyetinin daha yüksek olduğu belirlenmiştir (Wang, Zhang ve Sun, 2003). Beton için olumsuz sonuçlar oluşturan alkali-silika reaksiyonlarına karşı yapılan çalışmada farklı tane boyutlarında ve farklı miktarlarda kullanılan uçucu küllerin, betonun mekanik özelliklerini iyileştirdiği gözlemlenmiş olup alkali-silika reaksiyonları nedeniyle oluşan genleşmeleri zararsız seviyelere indirgediği belirtilmektedir (Aydın, Karatay, ve Baradan, 2010).

- **Silis Dumanı:** Silis dumanı slikerokrom veya silisyum metalinin alaşımlarının üretimi esnasında ortaya çıkan gazın hızla soğutulmasıyla oluşan ve filtrelerde toplanarak elde edilen %85-98 oranında silis içeren bir yan üründür (Çetin, Baki ve Gürbüz, 2018; Erzenin, 2019). Silis dumanı; mikrosilika, silika tozu veya silika fume gibi isimlerle de ifade edilmektedir (Erdoğan, 2003). Normal portland çimentosunun tane boyutundan yaklaşık 100 kat daha küçük tane boyutuna sahip olan silis dumanının tane çapı 0,1-0,2 mikron dolayındadır. Oldukça ince olan silis dumanı, bu inceliği sayesinde uçucu kül ve cürufa göre daha reaktif özellik gösterebilmektedir (Hamalı, 2007). Silis dumanı inceliği sayesinde çimentonun nüfuz edemediği alanları doldurarak ve çimentonun hidrasyonu sırasında oluşan kalsiyum hidroksit ile reaksiyona girerek CSH jeli oluşturarak daha dayanıklı bir beton üretilmesini sağlamaktadır (Uluöz, Özbebek, Arslan ve Açık, 2013). Puzolanik aktivitesi çok yüksek olan silis dumanı çimento üretiminde doğrudan kullanıldığı gibi yüksek dayanımlı beton üretiminde %10 kadar çimento ile yer değiştirilerek de kullanılmaktadır (Erdoğan ve Erdoğan, 2007).

Zhang vd. (2018) çimento harcında silis dumanı kullandıkları çalışmada, silis dumanının yüksek puzolan aktivitesi ve boşlukları hızlı doldurma yeteneği sebebiyle harcın gözenek yapısında iyileşmeler, sızdırmazlığında ve basınç dayanımında artışlar gözlemlenmişler ve bu harcın yüzey koruma malzemesi olarak kullanılmasını önermişlerdir. Silis dumanının %10-30 arasında çimentoyla ağırlıkça yer değiştirilmesiyle üretilen harçlarda da alkali-silika

reaksiyonlarının etkisinin önemli oranda azaldığı gözlemlenmiştir (Uygunoğlu, 2009). Mehta ve Ashish (2020), silis dumanı ve cam artıklarını birlikte kullanarak yaptıkları bir çalışmada, silis dumanının çimentonun hidratasyonunu hızlandırarak betonun basınç, yarma ve eğilme dayanımını artırdığını tespit etmişlerdir.

- **Yüksek Fırın Cürufu:** Yüksek fırın cürufu, demir ve metallerin üretimi ya da bu metallerin arıtılması işlemlerinde atık ürün olarak ortaya çıkan malzemedir (Öz, 2017). Demir üretiminde 1500 °C sıcaklıkta demirin eritilmesi sırasında fırının üst kısmından alınan cüruftur (Yılmaz, Erçikdi ve Cihangir, 2017). Cürufun bağlayıcılık özelliği kimyasal yapısına, inceliğine ve kompozisyonuna bağlı olarak değişmektedir (Tokyay ve Erdoğdu, 2003).

Yüksek fırın cürufunun bağlayıcılık kabiliyeti elde edildikleri ürün tipi ve üretim yöntemiyle doğrudan ilişkilidir. Yüksek fırın cürufu G ve H tipi olmak üzere iki kategoride değerlendirilirler. G tipi cüruflar, ergimiş cürufun hava veya su marifetiyle soğutulmasıyla elde edilen fakat puzolanik özelliği az olan bir çeşittir. Tip H cürufu ise, içeriğindeki camsı maddenin yüksek olması ve çok hızlı soğutulmasıyla daha fazla reaktif olmasından dolayı puzolanik özelliği yüksek olan ve beton üretiminde daha fazla kullanılan cüruftur (Erdoğdu ve Kurbetçi, 2003).

Kendiliğinden yerleşen betonlar üzerinde yapılan bir araştırmada, çimento yerine %15 oranında yüksek fırın cürufu kullanılmasının işlenebilirliği %20 dolayında iyileştirdiği gözlemlenmiştir (Boukendakdji, Kadri ve Kenai, 2012).

Yazıcı (2007), reaktif pudra beton üretiminde çimentonun yerine yüksek fırın cürufunu kullanılabilirliği üzerine yürüttüğü çalışmada, %40 cüruf ikamesinin betonun basınç dayanımını artırdığını belirlemiştir. Bir başka çalışmada ise, Cho, Lee ve Choi (2017) alüminatla zenginleştirilmiş çelik cürufu, normal portland çimentosu, granüle yüksek fırın cürufu ve alçı kullanılarak üretilen betonların basınç dayanımının arttığı ve büzülme oranının ise azaldığını ifade etmişlerdir. Normal çimento, alüminatla zenginleştirilmiş çelik cürufu ve alçı kullanılmasıyla dökülen betonda etrenjitin daha ince, normal çimento-alüminatla zenginleştirilmiş cüruf-granüle yüksek fırın cürufuyla üretilen betonda ise daha kalın etrenjitlerin oluştuğu görülmüştür. Üretilen etrenjitlerdeki bu form değişikliğinin basınç ve büzülme iyileştirmesinin sebebi olduğu belirtilmiştir.

2.1.4.3. Puzolanik Özellikleri Olan Tarımsal Atıklar

Tarımsal ürünlerin üretimi, hasadı veya işlenmesi sırasında oluşan arazide kalan veya ürünlerin yenilebilir kısımlarından arta kalan parçalara genel olarak bitkisel atık denilmektedir. Tüm atıklarda olduğu gibi tarımsal atıkların da bertaraf edilmesinde geri dönüştürülmesi, yeniden işlenmesi, gübre olarak kullanılması ve yakılması gibi alternatifler uygulanmaktadır. Özellikle yakılmaları sonucunda oluşan küller ise bir başka atığı ortaya çıkarmaktadır. Fındık, fıstık ve pirinç kabuğu, şeker kamışı, palmye yağı, ayçiçek sapı, buğday sapı gibi organik atıkların yakılması sonucunda elde edilen küller içerdikleri yüksek orandaki silis ve alümin nedeniyle puzolanik özellik göstermekte ve inşaat malzeme sektöründe betonların özelliklerini iyileştirmek adına kullanılabilirler.

Kazmi, Munir, Patnaikuni ve Wu (2017) yürüttükleri bir çalışmada, alkali-silika reaksiyonlarının beton üzerindeki olumsuz etkilerini azaltmak için şeker kamışı külünün çimento yerine farklı oranlarda kullanılmasının betonda alkalilerin daha fazla bağlamasına ve bu sayede betonda oluşabilecek potansiyel alkali-silika probleminin kontrol altına alınabildiği bildirilmişlerdir. Yine alkali-silika reaksiyonlarına karşı dayanıklılığı artırmak için yapılan diğer çalışmada, Bambara fındık kabuğu %0, %5, %10, %20, %30 ve %40 oranlarında çimento yerine kullanılmış ve %5 oranına kadar kullanımın alkali-silika reaksiyonunu azalttığı belirlenmiştir (Alaneme ve Mbadike, 2021).

Ogork ve Uche (2014) tarafından farklı tane boyutuna sahip yer fıstığı kabuğu külünün harç özellikleri üzerine etkisinin araştırıldığı bir çalışmada, yer fıstığı kabuğu külünün düşük reaktiviteye sahip olduğu belirlenmiş, büzülmenin ince malzeme miktarıyla arttığı gözlemlenmiştir. Aynı çalışmada karışıma giren külün tane boyutu küçüldükçe basınç ve eğilme dayanımının arttığı da belirlenmiştir. Nijerya'da beton üretiminde yer fıstığı kabuğu külünün çimento yerine kullanılabilirliği üzerine yapılan diğer çalışmada (Buari, Ademola ve Ayegbokiki, 2013), karışıma giren kül miktarının 21, 28 ve 56 günlük basınç ve yarma dayanımlarını azalttığı saptanmıştır. Ancak %10 kül kullanılan beton örneklerinin basınç dayanımlarının Nijerya standartlarına göre kabul edilebilir olduğu ve bu betonların özellikle kütle betonlarda kullanılabileceği belirtilmiştir. Fıstık kabuk külünün çimentoyla ikame edilmesiyle üretilen betonların 28 günlük basınç dayanımlarının araştırıldığı diğer çalışmada Alabandan, Olutoye, Abolarin ve Zakariya (2005), üretilen örneklerin basınç dayanımı şahit numune için 31,24 MPa iken %10 ikameli küplerde basınç dayanımı 20,68 MPa'a kadar düşmüş ve bu oranın üstünde kullanılmaması raporlanmıştır. Yer fıstığı külünün puzolanik

reaksiyonu ve hidratasyon davranışını araştıran Ikumapayi, Arum ve Alaneme (2021), %8 oranında çimento kül değişimiyle oluşan kalsiyum silikat hidrat miktarının, partiküllerin bir araya gelmesinde ve mikro yapıda bütünlük anlamında verimlilik gösterebildiği belirtilmiştir.

Srinivasan ve Sathiya (2010), şeker rafinasyonu sonucunda ortaya atık olarak çıkan şeker kamışı küspesini yakarak elde edilen külün betonda çimento yerine farklı ağırlıklarda kullanılması üzerine yürüttüğü bir çalışmada, üretilen betonlardaki kül oranının %10'a kadar avantajlı olabileceği belirtilmiş ancak en uygun oranın %1 olduğu vurgulanmıştır. Külün çimento ile kısmi yer değiştirmesinin taze betonda işlenebilirliğini artırdığından akışkanlaştırıcı katkı kullanımının azaltılmasında etkili olabileceği raporlanmıştır. Şeker kamışı külünün farklı ısı işlem görmüş (600-700-800 ve 900 °C) külün farklı kütleme zamanlarını göz önüne alarak yapılan bir başka çalışmada Ferreira vd. (2017), C-S-H jelinin davranışını analizlerde değerlendirmeye alınmış ve %20 oranında kül çimento değişiminin kül atıklarının değerlendirilmesinde iyi bir seçenek olduğu ifade edilmiştir.

Yapay puzolan olan yüksek fırın cürufu ve şeker kamışı külünün birlikte betonun içinde aynı anda kendi aralarında yüzde bazında farklı oranlarda (100/85, 85/15, 75/25, 67/33 ve 50/50) kullanılmasıyla yapılan bir diğer araştırmada, 75/25 oranı ile üretilen örneklerin basınç dayanımlarının diğer karışım oranlarına kıyasla daha iyi sonuçlar verdiği açıklanmıştır (Moraes vd., 2017). Uçucu kül ve şeker kamışının birlikte kullanıldığı bir başka araştırmada Yashwanth ve Nagarjuna (2016), puzolanların kullanılmasıyla işlenebilirliğin arttığı ve %15 ikame oranına kadar basınç dayanımında artışlar gözlemlendiği belirtilmiştir. Ayrıca, çimento yerine şeker kamışı külünün kullanıldığı taze ve sertleşmiş beton özelliklerinin araştırıldığı kendiliğinden yerleşen beton örneklerinin hazırlandığı bir diğer çalışmada (Sua-Iam ve Makul, 2017), işlenebilirlik için kullanılan slump değerleri genel olarak hedef değerinde kalmış olmasına karşın, basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve su emme gibi parametrelerde olumsuz sonuçlara ulaşıldığı belirtilmiştir.

Palm yağı yakıt külünü 3 farklı tane boyutuna getirerek %10, %20, %30 ve %40 oranlarında çimento yerine külü kullanarak betonun mekanik ve fiziksel özelliklerinin değişiminin araştırıldığı bir çalışmada (Tangchirapat, Saeting, Jaturapitakkul, Kiattikomol, ve Siripanichgorn 2007), normal incelikteki kül karışımli örneklerin basınç dayanımlarının çimentoya göre daha düşük olduğu sonucuna varılmıştır. Ancak, orta incelikteki ve %20 çimento değişimi olarak kullanılan külün 90 günlük basınç dayanımının, şahit numunesinin basınç dayanımını %90 oranında karşıladığı belirtilmiştir. En ince tane büyüklüğüne sahip olan

külün de %30 çimento ikamesi yapılmasına karşın, 90 günlük basınç dayanımında şahit numunesi kadar dayanım gösterdiği ifade edilmiştir.

Memon, Javed ve Khushnood (2019) tarafından betonda kısmi olarak kum yerine belirli yüzdelerde (%0, %5, %10, %15 ve %20) mısır koçanı külünün kullanıldığı betonun fiziksel ve kimyasal özelliklerindeki değişimin araştırıldığı çalışmada, örneklerdeki kül yüzdesi arttıkça, taze betonda slump ve büzülme değerleri artarken yoğunlukta düşüşler tespit edilmiştir. Sertleşmiş betonda; basınç dayanımı, ultrasonik ses hızı değerlerinde kayıplar kaydedilmiştir. Ancak, %10 ikameli numunenin 28 günlük basınç dayanımı, Türkiye deprem bölgelerinde yapılacak yapılara uygulanan koşulları yerine getirdiği için külün ince agrega yerine kullanılabilceği vurgulanmıştır. Mısır koçanı külünün %0-25 arasında farklı oranlarda kullanılmasıyla 9 farklı sınıfta beton üretilerek yapılan bir diğer çalışmada, kül yüzdesinin artmasıyla işlenebilirlikte azalma kaydedilmiş, erken basınç dayanımında da şahit numuneye göre azalma gözlenmiştir. Ancak, sertleşmiş beton dayanımında 180 günlük kür süresi için %8 oranında kullanılan külün mekanik özellikler açısından uygun olduğu vurgulanmıştır (Adesanya ve Raheem 2009).

Mısır, ayçiçeği ve buğday sapı külü ile barit ve kolemanitin birlikte beton içinde kullanıldığı çalışmada mısır sapı külü içeren örneklerin 28 günlük basınç dayanımları şahit numunesine göre çok yüksek olarak ölçülmüştür. Aynı numunenin, aşınma dayanımı %11 daha düşük bulunmuştur. Mısır sapı külünün %5 ve kolemanit katkısının %1 olacak şekilde hazırlanan örneklerin 180 günlük basınç dayanımı şahit numuneden %15 daha fazla olarak tespit edilmiştir (Örtlek, 2015).

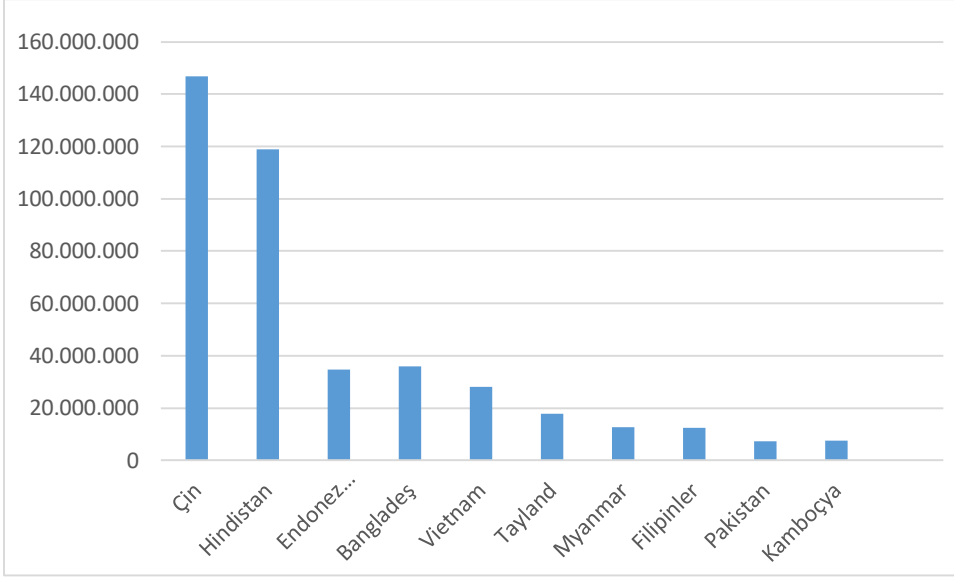
Ataie ve Riding (2013) tarafından yapılan çalışmada, buğday sapı külünün çimento yerine farklı oranlarda ikame edilerek en optimum değişim miktarının %20 olduğu belirtilmiş ve bu değişimin harç numunelerinin basınç dayanımına olumlu katkıları olduğu vurgulanmıştır. Bunun sebebi olarak da, hamurda oluşan kalsiyum hidroksit varlığının ve buna ek olarak külün amorf silis içeriği ile ilişkili olabileceği üzerinde durulmuştur. Buğday sapı külünün çeşitli öğütme aşamalarına tutularak külün tane boyutunun beton üzerine olan etkilerini araştırmak üzere ağırlıkça %30'a kadar külün çimento ile ikame edildiği bir diğer çalışmada (Qudoos, Kim ve Ryou, 2018), çimentonun %20 oranındaki külle değişimi sağlanarak en az 60 dakika boyunca reaksiyona izin verildiğinde gelişmiş ve kaliteli bir yapı malzemesi üretilebileceği belirtilmiştir. Betonun basınç dayanımı, elastisite modülü ve eğilme dayanımı gibi mekanik özelliklerinin iyileştirilmesini amaçlayan %20 buğday sapı külü ve çimentonun yer

değiştirilerek karışımlar hazırlanmasıyla Bheel, Ibrahim, Adesina, Kennedy ve Shar (2021), tarafından yapılan bir diğer çalışmada, %10 ikame miktarı dayanım açısından en iyi sonuçları vermiş ve normal kontrol betonuna kıyasla basınç dayanımında %12, çekme gerilmesinde %10 ve eğilme dayanımında %11 oranlarında gelişme görülmüştür. Diğer taraftan külün yüksek yüzey alanı ve fazla su emmesinden dolayı işlenebilirlikte azalma olduğu raporlanmıştır. Buğday sapı külü ve bentonitin %0, %5, %10, %15 ve %20 ağırlıktaki çimento ikamesiyle beraber kullanılmasıyla taze betonun geçiş kabiliyeti ve akışkanlığının sertleşmiş betonun da basınç ve çekme dayanımlarının araştırıldığı bir diğer çalışmada, kendiliğinden yerleşen beton için önemli özelliklerden olan geçiş kabiliyetinde azalma olduğu saptanmıştır. Ayrıca, %10 ve %15 ikameli numunelerin basınç ve çekme dayanımlarında olumlu etkilerin olduğu belirtilmiştir. Bentonit ve buğday sapı külü uygun koşullar sağlanabildiğinde başarılı bir şekilde betonda nötralize olabileceği önerilmiştir (Ahmad vd., 2021).

2.2. Çeltik Kavuzu Külü (ÇKK)

Beton üretiminde puzolan olarak kullanılan bir diğer tarımsal atık kül de çeltik kavuz külüdür. Bilindiği gibi pirinç, çeltiğin fabrikalarda işlenmesiyle bir başka deyişle tane üzerindeki kabuklardan ayrılmasıyla elde edilir. Bu kabuk iki farklı katmandan oluşmaktadır. İnce zar şeklinde olan ilk kabuğun besin değeri yüksek olduğu için genelde hayvan yemi olarak tüketilmektedir. Kavuz denilen diğer katman ise pirincin en dışındaki tabakadır ve yapısı, iklim, jeolojik yapı, su gibi etmenlere bağlı olarak değişkenlik gösterse de bileşiminde C, H, O, N, Sİ, Fe, Al, Ca, Mg, Na, K, P, Cu, Mn, ve Zn gibi elementler bulunmaktadır. Çeltik kavuzu hafif olması, içerdiği %20 oranındaki silis miktarı ve besin değerinin düşük olması nedeniyle daha çok barınaklarda atık olarak, demir çelik sanayisinde soğutma işlemlerinde, havai fişeklerde kaplama malzemesi olarak, yalıtım malzemesi üretiminde ve enerji üretiminde biyoyakıt veya yakıt briketi olarak kullanılmaktadır. Özellikle direk veya briket şeklinde yakılması sonucunda oluşan külün iskeletini silis oluşturmakta ve yapısında %80-90 arasında bulunan SiO₂ ise küle puzolanik özellik kazandırmaktadır (Erdoğan ve Erdoğan, 2007).

Dünyada pirinç üreten ülkeler incelendiğinde, 2019/2020 yılı verileri için yaklaşık 146,7 milyon ton ile Çin ilk sırada, 118,9 milyon ton ile Hindistan ikinci sırada yer almaktadır. Endonezya Bangladeş ve Vietnam da büyük üreticiler arasında yer alırken, Türkiye pirinç üretimi yaklaşık 0,6 milyon tondur (Anonim, 2021-b).



Şekil 2.1. Ülkelerin 2019/2020 yılı dünya pirinç üretim miktarları (ton)

Üretilen 1 kg pirinçten yaklaşık 200 gram kavuz çıkmaktadır (Mazlum, 1989). Bu 200 gram kavuz yakıldığında ise yaklaşık 40 gram kül elde edilmektedir. Bu yaklaşımla üretilen pirinç miktarının %20'si kadar kavuz %4'ü kadar da kül oluştuğu söylenebilir (Erdoğan ve Erdoğan, 2007). Türkiye'nin 2020 yılında yıllık çeltik üretimi 980.000 ton, pirinç üretimi ise yaklaşık 600.000 ton olup (Anonim, 2021-b) yıllık oluşan atık kavuz miktarı 120.000 ton ve potansiyel kül miktarı da 24.000 ton olarak hesaplanabilir. Oluşan yüksek miktarda külün bertaraf edilebilmesi için bu malzemenin puzolan olarak beton sektöründe kullanılması, çevresel, ekonomik ve beton üzerindeki olumlu etkileri sebebiyle son yıllarda yoğun olarak araştırılan bir konu haline almıştır.

Kıvrak ve Başyigit (2012), çeltik sapının 400°C-1000°C arasında farklı sıcaklıklarda 1,5 saat süreyle yakıldıktan sonra öğüttükleri küllerin fiziksel ve mekanik yöntemler kullanarak puzolanik aktiviteyi araştırmışlar ve puzolanik özelliklerin en aktif hale geldiği yakma sıcaklığının 600°C olduğunu belirlemişlerdir. Bu sıcaklıkta yakılan pirinç kabuğu küllerinin %0, %10, %15, %20, %25 ve %30 oranlarında çimento yerine kullanımının basınç ve yarmada çekme dayanımları üzerine etkilerinin incelendiği Yıldız, Balaydın ve Ulucan (2007) tarafından yapılan bir diğer çalışmada, %10 oranında kül kullanımının basınç ve yarmada çekme dayanımlarını arttırdığını kaydetmişlerdir. Bu orandan fazla kül kullanımının betonun mekanik özelliklerinde düşüşe neden olduğu gözlemlenmiş ve bu düşüşün artan su emme ve boşluk oranıyla ilişkili olduğu ifade edilmiştir.

Pirinç külünün cam agrega bileşenli olarak üretilen hafif kompozit harç örneklerine olan etkisinin araştırıldığı Gündüz ve Kalkan (2017) tarafından yürütülen bir çalışmada, erken dönem (7-14 gün) basınç dayanımlarının %10-12 azaldığı, ancak özellikle geç dönem (90-120 gün) dayanımlarının %15-18 arttığı belirlenmiştir. Çimento yerine kül kullanım oranının %28'e kadar arttırılmasının dayanımda değişikliğe sebep olmadığı saptanarak bu miktarda külün harçta kullanılması önerilmiştir.

Normal geleneksel beton ve kendiliğinden yerleşen beton üzerinde pirinç kabuğu külünün etkisi, farklı çimento-kül değişim oranları (%10-20) ve farklı su/çimento oranları (0,35-0,40) şeklinde tasarlanmasıyla üretilen betonların basınç ve eğilme dayanımları ile elastisite modülü değişimleri incelendiği Ahmadi, Alidoust, Sadrinejad ve Nayeri (2007) tarafından yapılan bir çalışmada, şahit numuneye göre yapılan kıyaslama sonucunda, pirinç kavuzu külünün dökümden 60 gün sonrasında pozitif etki sağladığı bildirilmiştir. Elastisite modülü dışında tüm mekanik özelliklerde kendiliğinden yerleşen beton geleneksel betona kıyasla daha iyi sonuç verirken, en iyi ikame yüzdesinin %20 olduğu vurgulanmıştır. Kendiliğinden yerleşen beton üretiminde bağlayıcı maddenin bir kısmı farklı oranlarda (%0, %20, %30, %40) pirinç kabuğu külü ile yer değiştirilmiş ve taze betonda, kalıba yerleşme ve akıcılık kabiliyeti ile ayrışma direncinin, sertleşmiş betonda basınç ve gerilme dayanımlarının test edildiği bir diğer çalışmada; genel olarak, kendiliğinden yerleşen beton üretiminde pirinç kavuzu külünün kullanılmasında iyi bir potansiyel olduğu hatta düşük maliyetli ev projelerinde kullanılabileceği ifade edilmiştir (Rahman, Muntohar, Pakrashi, Nagaratnam ve Sujan, 2014).

Ultra yüksek performanslı beton üretiminde pirinç kabuğu külü ve yüksek fırın cürufu birlikte kullanarak yapılan bir çalışmada, yüksek performanslı betonda pirinç kavuzu külü hem çok yüksek bir puzolanik etki oluşturmuş hem de betonun gelişmesinde beton içinde olumlu etkilere neden olduğu bildirilmiştir (Van, Röbber, Bui ve Ludwig, 2014).

Yüksek dayanımlı beton üretiminde kullanılan silis dumanının sınırlı miktarda ve yüksek maliyetli olması nedeniyle yerine pirinç kavuzu külü kullanılmasının uygunluğunun araştırıldığı bir diğer çalışmada, tane boyutu 3,6 – 9,0 µm olan pirinç külü kullanılarak 150 MPa dayanıma sahip beton üretilmiştir. Çalışmada, pirinç külünün basınç dayanımının gelişimine etkisinin uçucu külden daha büyük olduğu vurgulanmıştır (Van Tuan, Ye, Van Breugel, Fraaij ve Dai Bui, 2011). Yüksek dayanımlı beton üretilen bir başka pirinç kavuzu külü çalışmasında, %0, %5, %10 ve %15 oranlarında kül iki farklı incelikte (M40 ve M50) harca konulmuş ve

%10 kül değişim oranına kadar basınç dayanımı, çekme dayanımı ve eğilme dayanımında iyileşmeler gözlenmiştir (Kishore, Bhikshma ve Prakash, 2011).

Pirinç kavuzu külünün öğütülmesiyle oluşan parçacık boyutu ve yüzey alanının etkisinin araştırıldığı çalışmada, işlenebilirlik, taze beton yoğunluğu, akışkanlaştırıcı içeriği ve basınç dayanımı incelenmiştir. Betonda bulunan kül varlığı suya olan talebi artırmıştır. %10 kül kullanılarak üretilen betonda şahit numunesine kıyasla %30,8 civarında basınç dayanımında gelişmeler tespit edilmiştir. Eklenecek kül miktarının %20'ye kadar, çok fazla dayanım kaybına neden olmadığı ve külün bu orana kadar kullanılabileceği belirtilmiştir. Külün inceltilmesi ile beton dayanımında daha iyi sonuçlar elde edildiği belirtilmiştir (Habeeb ve Mahmud, 2010).

Puzolan olmayan mermer tozu ve pirinç kavuzu külünün birlikte kullanılarak betonun hidratasyon davranışı ve mekanik özelliklerinin çalışıldığı araştırmada (Jain, 2012), farklı su/çimento oranları (0,30-0,35-0,38) göz önüne alınarak mermer tozu (%20, %40, %60) ve pirinç kavuzu külü (%10, %20, %30) çimento yerine ayrı ayrı betonda kullanılmıştır. Mermer tozu kullanımı dayanımda azalmaya neden olmakla birlikte en yüksek dayanım %20 mermer ikamesinde sağlanmış olup 28 günlük dayanımı en yüksek 54,5 MPa'a ulaşırken, kül kullanımı dayanımda artmaya sebep olmuş ve %20 ikamede 65,9 MPa'a kadar dayanım sağlamıştır.

Jamil, Khan, Karim, Kaish ve Zain (2016) pirinç kavuzu külünün hamura olan fiziksel ve kimyasal etkilerinin hamurda oluşturduğu basınç dayanımı, eğilme dayanımı, durabilite ve mikroyapı değişikliklerini ele alan bir çalışma yapmıştır. Hamurun basınç dayanımının puzolanik aktivite ve boşlukların daha iyi dolmasıyla arttığı, ancak bu puzolanik aktivitenin etkisinin erken dayanımda oldukça az miktarda olduğu söylenmiştir. Puzolanik aktivitenin; tane boyutuna, hamurun yaşına (üretildiği günden o ana kadar geçen süreye) ve çimento değişim yüzdesine bağlı olduğu raporlanmıştır.

Özellikle betonarme yapılarda betonların geçirimsizliğinin yüksek olması nedeniyle yaşanan korozyon problemini pirinç kavuzu külü kullanarak çözmeyi hedefleyen çalışmada, %5-30 arasında çimento-kül değişimi şeklinde 6 farklı sınıfta hazırlanan örnekler testlere tabi tutulmuştur. Pirinç kavuz külünün %30'a kadar kullanılmasının, betonda klorür geçirgenliğini azalttığı dayanım ve korozyon direncini artırdığı belirtilmiştir (Saraswathy ve Song, 2007).

Amerika Birleşik Devletleri ve Uruguay'da yetişen çeltiklerden temin edilen pirinç kavuzu küllerinin farklı işlemlerden geçerek (çeltik değirmen endüstrisi ve kontrollü yakma) elde edildiği belirtilen çalışmada, pirinç kabuğu külleri çimento yerine %10 ve %20 oranlarında

kısmi olarak kullanılmış ve su / çimento oranı da 0,50, 0,40 ve 0,32 olacak şekilde deneyler yapılarak betonların, dayanımları ve geçirgenliği şahit numuneleri ile kıyaslanmıştır. Külün erken dayanımda basınç dayanımına katkısı tespit edilmiştir. Uzun dönemli dayanımda; kontrollü yakma ile elde edilen külün betonun davranışına olan etkisinin daha önemli olduğu sonucuna varılmıştır. Külün doldurucu ve puzolanik etkisinin önemi, çekme dayanımı ve geçirimsizlik özelinde ortaya çıktığı ifade edilmiştir (de Sensale, 2006).

Khan vd. (2012) çimento yerine farklı oranlarda pirinç kabuğu külü kullanarak betonun basınç dayanımı, eğilme dayanımı, kimyasal etkilere karşı dayanımı ve maliyet durumunu incelemiştir. Çimento yerine %25 oranında kullanılacak kül ikamesinin mekanik özelliklerinin geleneksel betonla aynı veya daha iyi sonuçlar verdiği belirtilmiştir. Çalışmada, betonarme bir okulun inşasında ağırlıkça çimento yerine %25 kül ikameli betonun kullanılması ile herhangi bir dayanım kaybı olmaksızın çimento maliyetinde %31,5 oranında azalma olacağı öngörülmüş ve okulun toplam maliyetinde %14,2 azalma sağlanabileceği bildirilmiştir.

Pirinç kabuğunun betonda kullanımının uygunluğu; iyileştirilmiş bir yakma yaklaşımı, külün puzolanik aktivitesinin optimizasyonu, kül ile harcın dayanıma olan etkisi, karışım sonucunda elde edilen örneklerin sülfata karşı direnci ve külün kullanımının çevresel etkilere karşı oluşturduğu reaksiyonun durumunun beş farklı yöntem belirlenerek yapıldığı çalışmada, HCL kullanılarak yapılan yanma tekniği ile 600 °C sıcaklıkta kül oldukça aktif hale getirilmiştir. Çalışmada maksimum %15'e kadar kullanılan kül miktarı ile tüm harç çubuklarının basınç dayanımları tüm kırım günlerinde artmıştır. Yüksek basınç dayanımındaki artışın (%15) önemi vurgulanmıştır. CSH jelinin stabilizasyonu ile ortaya çıkan gözeneklerdeki iyileşme ile sülfata karşı olan direncin arttığı belirtilmiştir. Gelecekte yapılacak yüksek katlı binaların yapımında kullanılacak yüksek performanslı beton üretiminde, pirinç kavuzu külünün kullanılabilirliği önerilmiştir (Hu, He ve Zhang, 2020).

Rattanachu, Toolkasikorn, Tangchirapat, Chindaprasirt ve Jaturapitakkul (2020) pirinç kabuğu külünü %20-50 oranlarında çimentoyle kısmi olarak yer değiştirerek betonun basınç dayanımı, donatı korozyonu ve klorür penetrasyonunun derinliğini incelediği çalışmada, %20 oranında kül çimento değişimi yapılan örneklerde 60 gün sonunda yapılan kırımlarda kül katkılı olanların daha yüksek basınç dayanımına sahip olduğu belirlenmiştir. Külün kullanıldığı %20'den %50'ye kadar olan tüm örneklerde çelik korozyonunun azaldığı ve klorür direncinin arttığı belirtilmiştir. Basınç dayanımında %50 yer değiştirme ile kayıplar yaşanmasına karşın,

en yüksek klorür direnci ve buna baęlı olarak da en dūşük elik korozyonu gōzlemlendięi ifade edilmiřtir.

Bu çalıřmanın amacı; tarımsal ūretim artıęı olan eltik kavuzunun yakılması sonucu oluřan kūlūn, beton yapımında puzolan olarak kullanılabilirlięinin arařtırılmasıdır. Çalıřmada bir bakıma atıęın atıęı olan kūlūn, tūm ūzellikleri incelenerek beton ūretiminde kullanılabilme olanakları deęerlendirilmiřtir. Bu kapsamda ūretilen betonların; fiziksel, mekanik ve termal ūzelliklerinin analizi yapılarak ekonomiye katkı saęlama durumu belirlenmiřtir. Bu yaklařımla Trakya bōlgesinde oldukça yoęun miktarda bulunan eltik atıęının iřlenmesi ve yanması sonucu oluřan kūlūnūn, betonda imento yerine kullanılarak dayanım ūzelliklerinin geliřtirilerek yararlı bir ūrūne dōnūřtūrūlmesi hedeflenmiřtir.



3. MATERYAL VE YÖNTEM

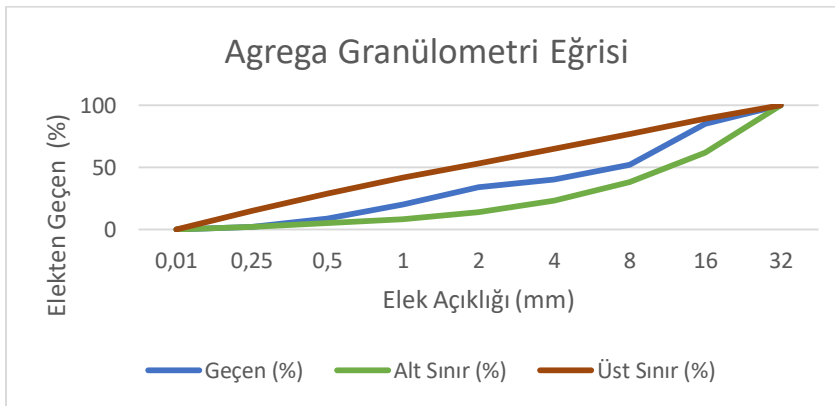
3.1. Materyal

Pirinç fabrikalarında yakıt olarak kullanılan çeltik kavuz külünün (ÇKK) puzolan malzeme olarak beton üretiminde kullanılabilirliğinin araştırıldığı bu çalışmada; araştırma materyalini, çimento, agrega, su ve çeltik kavuz külü ile bu malzemelerin farklı oranlarda kullanılmasıyla üretilen beton örnekleri oluşturmuştur. Materyali oluşturan bileşenlerin fiziksel ve kimyasal özellikleri Türkiye Hazır Beton Birliği İktisadi İşletmesi deney laboratuvarında belirlenmiştir.

3.1.1. Agrega

Çalışmada agrega olarak Tekirdağ yöresindeki ocaklardan temin edilen en büyük tane çapı 21 mm olan 1 ve 2 numara kırma çakıl ve doğal dere kumu kullanılmıştır. Kullanılan agreganın fiziksel ve kimyasal özellikleri ilgili firmanın laboratuvarlarında yaptırılan analiz sonucunda belirlenmiş ve Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Araştırma kapsamında üretilen beton örneklerinde yüksek kompasiteyi sağlamak ve taze betonda olabilecek ayrışmayı önlemek için TS EN 933-1 (2012) standartlarına uygun olarak agrega tane dağılımı belirlenmiştir. Tane büyüklüklerine göre iri ve ince agregalara ait numune dağılımları elek analizi sonucunda belirlenmiştir. Tüm agrega tane dağılımları için karışık agrega tane dağılımını belirlemek amacıyla belirli yüzdelerde denemeler yapılarak agrega granülometri eğrisi çizilerek Şekil 3.1’de verilmiştir (TS933-1, 2012).



Şekil 3.1. Agrega granülometri eğrisi

Çizelge 3.1. Kullanılan agreganın fiziksel özellikleri

| | Agrega Tane Büyüklüğü (mm) | | |
|--|----------------------------|--------|--------|
| | 0-5 | 5-12 | 12-21 |
| Agregaların Yassılık İndeksi | - | 9 | 10 |
| Agregaların Şekil İndeksi | - | 8 | 7 |
| Kavkı (Kabuk) İçeriği (%) | - | 0-SC10 | 0-SC10 |
| Çok ince malzeme içeriği (%) | 5,1 | 0,9 | 0,7 |
| Metilen Mavisi Deneyi (g/kg) | 1 | | |
| Los Angeles Katsayısı (%) | 27- LA30 | | |
| Tane Yoğunluğu (mg/m³) | 2,40 | 2,46 | 2,48 |
| | 2,51 | 2,55 | 2,56 |
| | 2,69 | 2,70 | 2,70 |
| Su Emme (Wa-%) | 4,50 | 3,50 | 3,40 |
| Özgül Ağırlık (kg/dm³) | 2,59 | 2,83 | 2,84 |
| Donma Çözünme Direnci (%) | 10 | | |
| Alkali-silika Reaktifliği (%) | 0,013 | | |
| Klorür oranı (%) | 0,004 | | |
| Asitte Çözünebilen Sülfat (%) | 0,094 | | |
| Toplam Kükürt (%) | 0,426 | | |

3.1.2. Çimento

Beton örneklerinin dökümünde, TS EN 197-1 (2012) standardına uygun olan ve ülkemizde hazır beton firmaları tarafından yaygın olarak tercih edilen CEM 1 42,5'lük çimento kullanılmıştır ve bu çimentoya ait çimentonun temin edildiği firma tarafından yapılan fiziksel ve kimyasal özellikler Çizelge 3.2'de verilmiştir.

Çizelge 3.2. Kullanılan çimentonun fiziksel ve kimyasal özellikleri

| Fiziksel Özellikler | | Kimyasal Özellikler | |
|--------------------------|--------|---------------------|--------|
| Blaine | 3821 | SO ₃ | 2,96 |
| Özgül Ağırlık | 3,15 | Klorür | 0,0188 |
| İncelik (90 Mikron) | 0,10 | Kızdırma Kaybı | 3,02 |
| Priz Başlangıcı (dakika) | 138 | Çözünmeyen Kalıntı | 0,39 |
| Priz Sonu (dakika) | 236 | C ₃ A | 7,12 |
| Hacim Genleşmesi (mm) | 1 | | |
| Basınç Dayanımı (MPa) | 2. Gün | 36,9 | |
| | 7. Gün | 48,1 | |
| | 28.Gün | 60,1 | |

3.1.3. Su

Beton üretiminde kullanılacak karışım suyunun TS EN 1008 (2003) ile Ekmekyapar ve Örüng (1993)'de belirtildiği gibi içilebilir nitelikte olmalıdır. Bu sebeple deneysel çalışmaların tamamında Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi Biyosistem Mühendisliği Laboratuvarında bulunan şebeke suyu kullanılmıştır. Kullanılan su için yapılan analiz sonucu Çizelge 3.3'de verilmiştir.

Çizelge 3.3. Kullanılan suyun Kimyasal Analiz Sonuçları

| Deney Adı | Standard | Sonuç | Sınır Değer |
|---|----------------------|---------------|--|
| Sülfat Muhtevası (SO ₄ ²⁻) | EPA 9038 (1986) | 9 ppm (mg/L) | 2000 ppm (mg/L) |
| Klorür Muhtevası (Cl ⁻) | TS EN 196-2 (2013) | 28 ppm (mg/L) | Öngörülen beton veya şerbet: 500 ppm Donatı veya metal içeren beton: 1000 ppm donatı veya metal bulunmayan beton: 4500 ppm |
| Sodyum Oksit (Na ₂ O) Miktarı | TS ISO 9964-3 (1999) | 52 ppm (mg/L) | - |
| Potasyum Oksit (K ₂ O) Miktarı | TS ISO 9964-3 (1999) | 2 ppm (mg/L) | - |
| Toplam Alkali Muhtevası | TS ISO 9964-3 (1999) | 53 ppm (mg/L) | 1500 ppm (mg/L) |
| PH değeri | TS EN 1008 (2003) | 7,2 | 4'den küçük olmamalıdır. |

*Analizler Türkiye hazır beton birliği iktisadi işletmesi deney laboratuvarında yaptırılmıştır.

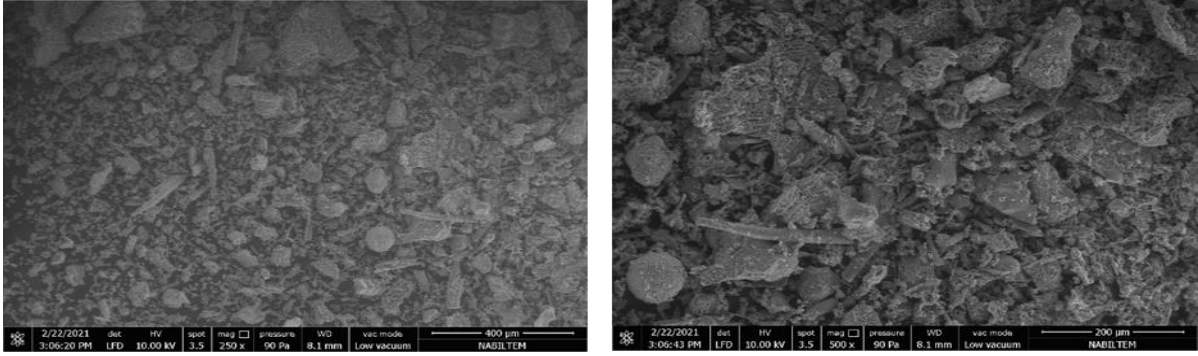
3.1.4. Çeltik Kavuzu Külü (ÇKK)

Araştırmanın amacını ve materyalini oluşturan ÇKK, Edirne ili İpsala ilçesinde yer alan çeltik fabrikalarından temin edilmiştir. Yörede çeltik kavuzları fabrikalarda yakıt olarak kullanılmakta olup kazan altında biriken küller ise atılmaktadır. Bu çalışmada atık malzeme olan bu ÇKK'lar alınarak 125 mikron elekten elenmiştir. Kullanılan ÇKK'ya ait malzemenin temin edildiği firma tarafından yapılan analiz sonucunda elde edilen kimyasal ve fiziksel özellikler Çizelge 3.4'de verilmiştir.

Çizelge 3.4. Çeltik kavuzu kül özellikleri

| Bileşen | Değer | Bileşen | Değer | Bileşen | Değer |
|------------------------------------|---------|------------------------------------|--------|------------------------------------|--------|
| MgO (%) | - | V ₂ O ₅ (%) | - | SnO ₂ (%) | 0,0059 |
| Al ₂ O ₃ (%) | 0,0897 | Cr ₂ O ₃ (%) | 0,0056 | Sb ₂ O ₃ (%) | 0,0007 |
| SiO ₂ (%) | 91,6000 | MnO (%) | 0,2220 | BaO (%) | - |
| P ₂ O ₅ (%) | 0,5050 | Fe ₂ O ₃ (%) | 0,6410 | PbO (%) | 0,0056 |
| SO ₃ (%) | 0,2110 | Co ₂ O ₃ (%) | 0,0059 | Ni (%) | 0,0022 |
| Cl (%) | 0,1610 | CaO (%) | 0,0049 | Mo (%) | - |
| K ₂ O (%) | 5,1400 | ZnO (%) | 0,0090 | Na ₂ O (%) | - |
| CaO (%) | 1,3800 | As ₂ O ₃ (%) | 0,0012 | | |
| TiO ₂ (%) | 0,0321 | CdO (%) | - | | |

Çizelge 3.4 incelendiğinde görüleceği gibi, ÇKK'nin bileşiminde yaklaşık %92 oranında SiO₂, Al₂O₃ ve Fe₂O₃ bulunuyor olması, literatürde (Erdoğan ve Erdoğan, 2007) ve (TS-25, 2008) standardında belirtilen puzolan malzemeler için verilen %70 sınırının oldukça üzerindedir. Bu nedenle ÇKK beton üretiminde kullanılabilecek potansiyel bir puzolan malzemedir. Araştırmada kullanılan ÇKK'nin, Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarında (NABİLTEM) bulunan elektron mikroskobu ile farklı büyütme oranlarında çekilen görüntüleri de Şekil 3.2'de verilmiştir. Görüntülerden araştırmada kullanılan ÇKK'lerin tane boyutlarının 125 mikronun altında olduğu ve amorf yapıları görülmektedir.



Şekil 3.2. ÇKK'nin (SEM) görüntüleri

3.2. Yöntem

Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi Ziraat Fakültesi Biyosistem Bölümü Malzeme laboratuvarında yürütülen bu çalışmada, agrega, su, çimento ve ÇKK kullanılarak 200 kg/m^3 , 250 kg/m^3 , 300 kg/m^3 ve 400 kg/m^3 olmak üzere dört farklı dozajda beton örnekleri üretilmiştir. Çalışmada, dört farklı dozaj için TS EN 450-1 (2013) ve TS EN 450-2 (2008) standartlarına olacak şekilde ve çimento ağırlığının %0, %5, %10 ve %20 oranlarında çimento ile yer değiştirmeli olarak kullanılan ÇKK ile üretilen beton örnekleri toplamda 16 farklı deneme konusunu oluşturmuştur. Her konu için 24 adet olmak üzere toplam 384 adet örnek üretilmiştir. Deneme konularının isimlendirilmesi aşağıda verilmiştir.

ÇKK Dozaj – Katkı Oranı (ÇKK 200-0 = 200 doz-%0 ÇKK)

Beton örnekleri dökülürken 1 m^3 beton içerisine girecek malzeme miktarları hedef dayanımı 400 doz için C 25 olacak şekilde karışım hesabı yapılarak ağırlık esasına göre belirlenmiştir. Karışımda kullanılacak agreganın ideal nem düzeyi olarak kuru yüzeyde doygun durumda olması hedeflenmiş ve kullanılan agreganın nem içeriği belirlenerek gerekli nem düzeltmesi yapıldıktan sonra karışıma giren malzeme miktarları hesaplanmıştır.

Gerekli düzeltmeler yapıldıktan sonra karışım hesabıyla miktarları belirlenen malzemeler (Çizelge 3.5) laboratuvar koşullarında hassas elektronik terazide tartılarak laboratuvar tipi beton karma makinesine yerleştirilmiştir. Karma makinesine önce agrega, çimento ve ÇKK dökülerek mikser çalıştırılmış tüm malzemeler karıştırılarak homojen karışım oluşturulmuştur. Daha sonra karışım suyu ilave edilerek mikser çalıştırmaya devam ettirilmiştir.

Çizelge 3.5. Dökülen örnekler için yapılan nihai tasarım hesabı

| Konu | Dozaj | Çakıl (kg) | Kum (kg) | Çimento (kg) | ÇKK (kg) | Su (kg) |
|------------|-------|------------|----------|--------------|----------|---------|
| ÇKK 200-0 | 200 | 1326,5 | 884,3 | 200 | 0 | 108 |
| ÇKK 200-5 | 200 | 1326,5 | 884,3 | 190 | 10 | 108 |
| ÇKK 200-10 | 200 | 1326,5 | 884,3 | 180 | 20 | 108 |
| ÇKK 200-20 | 200 | 1326,5 | 884,3 | 160 | 40 | 108 |
| ÇKK 250-0 | 250 | 1256,1 | 837,4 | 250 | 0 | 135 |
| ÇKK 250-5 | 250 | 1256,1 | 837,4 | 237,5 | 12,5 | 135 |
| ÇKK 250-10 | 250 | 1256,1 | 837,4 | 225 | 25 | 135 |
| ÇKK 250-20 | 250 | 1256,1 | 837,4 | 200 | 50 | 135 |
| ÇKK 300-0 | 300 | 1185 | 790,5 | 300 | 0 | 162 |
| ÇKK 300-5 | 300 | 1185 | 790,5 | 285 | 15 | 162 |
| ÇKK 300-10 | 300 | 1185 | 790,5 | 270 | 30 | 162 |
| ÇKK 300-20 | 300 | 1185 | 790,5 | 240 | 60 | 162 |
| ÇKK 400-0 | 400 | 1045,1 | 696,7 | 400 | 0 | 216 |
| ÇKK 400-5 | 400 | 1045,1 | 696,7 | 380 | 20 | 216 |
| ÇKK 400-10 | 400 | 1045,1 | 696,7 | 360 | 40 | 216 |
| ÇKK 400-20 | 400 | 1045,1 | 696,7 | 320 | 80 | 216 |

Puzolan kullanılarak üretilen betonların su/çimento oranı yeterli doğrulukta belirlenemediğinden beton karışım suyu, çimento dozajı ve hedeflenen beton kıvamına göre bir seri deney karışımı yapılarak saptanmaktadır. Bu sebeple TS EN12350-2 (2019) standardı göz önüne alınmış ve beton kıvamının S3 (plastik) olması öngörülmüştür. Üretilen betonların çökme değeri yaklaşık 12 ± 1 cm olacak şekilde bir seri deney karışımı yapılarak gerekli karışım suyu miktarları belirlenmiştir.

İstenilen kıvamda üretilen taze betonlarda çökme deneyi TS EN 12350-2 (2019)'de belirtilen metotla yapılmış ve beton sıcaklığı döküm esnasında termometre kullanılarak ölçülmüştür (TS EN 206-1 (2002) ; Anonim (2005)).

Her karışım oranı için istenilen kıvamda hazırlanan taze beton 150x150x150 mm³ ebatlarındaki standart küp kalıplara doldurulmuş ve sarsma tablasında 10 sn. vibrasyona tabi tutularak kalıba yerleşmesi sağlanmıştır (TS EN 12390-2, 2019). Araştırma kapsamında üretilen örneklerle ilgili görsel Şekil 3.3' de verilmiştir. Kalıplara dökülen örnekler 24 saat bekledikten sonra kalıplardan hava kompresörü yardımıyla çıkarılmış ve 20 ± 2 °C sıcaklıkta kirece doymun suda bekletilerek normal kür uygulanmıştır (TS EN 12390-2, 2019).



Şekil 3.3. Dökülen örnekler

Beton örneklerinin 7, 28 ve 90 gün sonunda sertleşmiş beton özellikleri olarak birim ağırlıklar TS EN 12390-7 (2019)'da, basınç dayanımları TS EN 12390-3 (2019)'de, yarma dayanımları TS EN 12390-6 (2010)'da, donma çözünme dayanımları TSE CEN/TR 15177 (2011)'de, su emme oranları TS EN 12390-7 (2019)'de belirtilen yöntemler kullanılarak belirlenmiştir. Üretilen örneklerin mikro yapılarının incelenmesi için Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi NABİLTEM bünyesinde SEM görüntüleri çekilmiştir. Ayrıca beton örneklerinin ısı iletkenlik katsayıları QTM 500 cihazı kullanılarak belirlenmiştir. Elde edilen tüm sonuçlar istatistiki açıdan incelenmiş ve karşılaştırılmıştır.

Üretilen beton örnekleri üzerinde yapılan tüm deney sonuçları istatistiki açıdan incelenmiş ve farklılıkların önemlilik düzeylerinin belirlenmesi amacıyla Varyans analizine tabi tutulmuştur. Ayrıca sonuçların değerlendirilmesi ve gruplar arası farklılıkların daha belirgin olarak sunulması için Duncan çoklu karşılaştırma testi uygulanmıştır. İki farklı değişken arasındaki ilişkiye detaylı açıklayabilmek için regresyon analizleri yapılmıştır.

3.2.1. Taze Beton Deneyleri

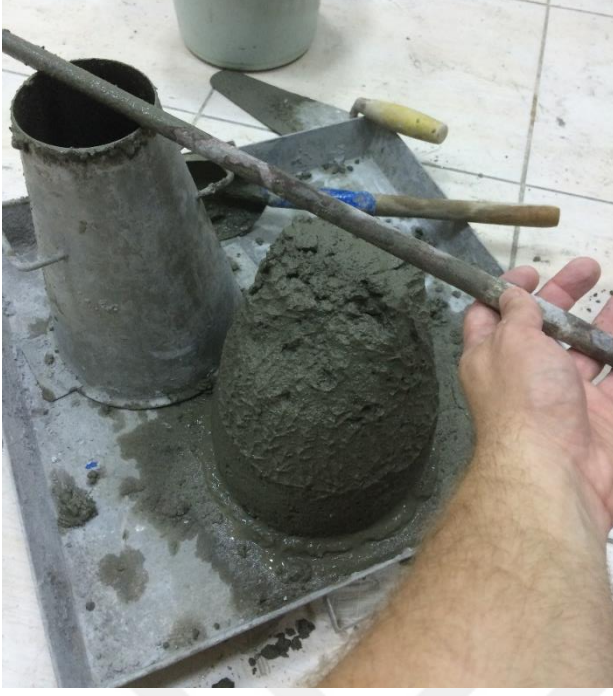
Yapılan araştırma kapsamında hazırlanan taze beton örneklerinin kıvamının sabit tutulabilmesi ve su/çimento oranının belirlenmesi için çökme deneyi ile priz, hidratasyon ve işlenebilirliği etkileyen beton sıcaklığı ölçümleri yapılmıştır.

3.2.1.1. Sabit Çökme Deneyi ve Su / Çimento Oranı

Beton örneklerinin dökümünde su/çimento oranının belirlenebilmesi için 12 ± 1 cm olacak şekilde sabit alınan çökme miktarı TS EN 12350-2 (2019) standardında tanımlandığı şekilde iç yüzeyi ile taban plakası yüzeyi su kalmayacak şekilde nemlendirilmiş Abrams konisine 3 seferde doldurulmuştur. Her seferde doldurulan taze beton 25 kez şişlenerek koni içerisine yerleşmesi sağlanmıştır. Üst yüzeyi düzeltildikten sonra Abrams konisi çekilerek betonun yanına konulmuş ve üst seviyesi ile taze betonun en üst kısmı arasındaki mesafesi ölçülmüştür. Çalışmada öngörülen çökme değeri yakalanıncaya kadar taze betona su ilave edilerek karışım suyu miktarı belirlenmiş ve dozaj göz önüne alınarak su/çimento oranı saptanmıştır (Şekil 3.4).

3.2.1.2. Sıcaklık

Tüm dökümler sırasında taze beton içerisine daldırılan dijital termometre yardımıyla karışım sıcaklıkları ölçülmüştür (Anonim (2005); TS EN 206-1 (2002)).



Şekil 3.4. Çökme (Slump) deneyi

3.2.2. Sertleşmiş Beton Deneyleri

Normal kür uygulanarak 7, 28 ve 90 gün bekletilen sertleşmiş beton örnekleri üzerinde birim ağırlık, basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, donma çözünme dayanımı, su emme oranı, ısı iletkenlik katsayısı belirlenmiş ve ayrıca basınç dayanımında kırılan örneklerin SEM görüntüleri çekilmiştir.

3.2.2.1. Birim Ağırlık Deneyi

Örneklerin birim ağırlıklarını belirlemek amacıyla küp betonlar, 0,1 gr. duyarlıklı terazide tartılmış ve örnek hacimleri geometrik olarak hesaplanmıştır. Ağırlığın hacme oranlanmasıyla, farklı kül ve farklı dozajlar için TS EN 12390-7 (2019)' a uygun şekilde 3 serili olarak birim ağırlık deneyi yapılmıştır.

3.2.2.2. Su Emme Deneyi

Su emme deneyinde beton örnekleri her konu için 3 tekerrürlü olacak şekilde TS EN 12390-7 (2019) standardında verildiği gibi etüv yardımı ile 105 ± 5 °C sıcaklıkta 24 saat sabit sıcaklığa ulaşınca kadar kurutulmuş ve hassas elektronik teraziyle tartılarak kuru ağırlıkları belirlenmiştir (Şekil 3.5). Daha sonra bu örnekler su içinde 24 saat bekletilerek suya doymun

ağırlıkları bulunmuştur. Elde edilen verilerden yararlanılarak, ağırlık olarak su emme oranları Eşitlik 3.1 yardımıyla hesaplanmıştır.

$$\text{Su emme Oranı (\%)} = [(G2-G1)/(G1)] \times 100 \quad (3.1)$$

Eşitlikte ;

G1: Etüv kurusu ağırlığı (g),

G2: Kuru yüzey doygun ağırlığı (g).



Şekil 3.5. Numunelerin su emme deneyindeki etüv görüntüsü

3.2.2.3. Basınç Dayanımı Deneyi

Kür havuzunda 7, 28 ve 90 gün bekletilen örnekler üç tekerrürlü olarak TS EN 12390-3 (2019)'de verilen yönteme göre basınç dayanımı deneyine tabi tutulmuştur. Örnekler hidrolik pres aletinin başlıkları arasına yerleştirilerek dayanım deneyi yapılmıştır (Şekil 3.6). Örneğin kırıldığı anki en büyük yük kaydedilerek, basınç dayanımı aşağıda verilen Eşitlik 3.2 yardımıyla hesaplanmıştır.

$$\sigma = P / A \quad (3.2)$$

Eşitlikte ;

σ : Basınç dayanımı (MPa),

P: Kırılma anında ulaşılan en büyük yük (N),

A: Numunenin, üzerine basınç yükünün uygulandığı en kesit alanı (mm²).



Şekil 3.6. Hidrolik pres

3.2.2.4. Yarmada Çekme Dayanımı Deneyi

Yarmada çekme dayanımı 28 günlük standart küp örnekler üzerinde TSEN12390-6, (2010) standardına uygun olarak yapılmıştır. Her konu için üçer örnek yarma aparatı kullanılarak (Şekil 3.7) hidrolik preste kırılmış ve yarma dayanımları aşağıdaki Eşitlik 3.3 yardımıyla hesaplanmıştır.

$$f_{ct} = \frac{2 \times F}{(\pi \times L \times d)} \quad (3.3)$$

Eşitlikte ;

f_{ct} : Yarmada çekme dayanımı (MPa),

F: En büyük yük (N),

L: Numunenin yükleme parçasına temas çizgisi uzunluğu (mm),

d: Numunenin seçilen en kesit boyutu (mm).



Şekil 3.7. Yarmada çekme deneyi

3.2.2.5. Donma Çözünme Deneyi

Kür havuzunda 28 gün bekletilen ve her konu için üçer adet beton örnekleri, -20°C sıcaklıktaki dondurucuda 12 saat ve $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$ sıcaklıktaki kür havuzunda 12 saat olmak üzere 20 gün donma-çözünme çevrimine tabi tutulmuştur. Donma-çözülme çevrimi 20 kez tamamlanan örneklerin TS EN 1290-3 (2019) standardına uygun olarak basınç dayanımları belirlenmiştir (Şekil 3.8). Basınç dayanımlarında donma çözünme çevrimleri sonucunda oluşan dayanım kayıpları belirlenerek dona dayanıklılık saptanmıştır.



Şekil 3.8. Donma çözünme çevrimindeki örnekler

3.2.2.6. Isı İletkenlik Katsayısının Belirlenmesi

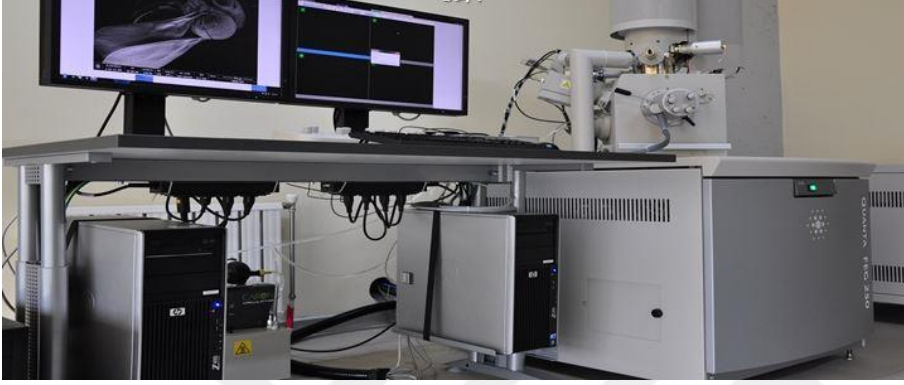
Beton örneklerinin ısı iletkenlik katsayıları İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü laboratuvarlarında bulunan KEM QTM 500 ısı iletkenlik katsayısı ölçüm cihazı kullanılarak, ASTM C 1113-90 (2004) standartlarına uygun şekilde ısı akıları ölçülerek belirlenmiştir (Şekil 3.9). Isı iletkenlik katsayısı belirlenirken her örnekte 3'er farklı noktadan ölçüm yapılmıştır.



Şekil 3.9. Isı iletim katsayısı ölçüm cihazı

3.2.2.7. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Görüntüsü

Araştırmada dökülen tüm konuların mikro yapı incelemesi için, basınç dayanımı deneyinde kırılmış beton örneklerinin kırılan yüzeyleri Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarında (NABİLTEM) bulunan SEM kullanılarak görüntülenmiştir (Şekil 3.10). Her konu için 20, 40, 100 ve 200 mikron olmak üzere 4 adet SEM görüntüsü çekilmiştir.



Şekil 3.10. Taramalı elektron mikroskobu (SEM)

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

4.1. Taze Beton Deneyleri

4.1.1. Su / Çimento Oranı

Farklı dozaj ve ÇKK kullanılarak üretilen taze betonların kıvamını 12 ± 1 cm çökme değerinde sabit tutacak karışım suyu miktarları her deneme konusu için ayrı ayrı belirlenmiştir. Her deneme konusu için belirlenen karışım suyu ve çimento miktarları kullanılarak su/çimento oranları hesaplanmış ve Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Çökme değeri 12 ± 1 için su/çimento oranları

| Konu | Dozaj (kg/m^3) | ÇKK Oranı (%) | Su/Çimento Oranı |
|------------|---------------------------|---------------|------------------|
| ÇKK 200-0 | 200 | 0 | 1,32 |
| ÇKK 200-5 | 200 | 5 | 1,35 |
| ÇKK 200-10 | 200 | 10 | 1,35 |
| ÇKK 200-20 | 200 | 20 | 1,32 |
| ÇKK 250-0 | 250 | 0 | 1,07 |
| ÇKK 250-5 | 250 | 5 | 0,89 |
| ÇKK 250-10 | 250 | 10 | 1,03 |
| ÇKK 250-20 | 250 | 20 | 1,01 |
| ÇKK 300-0 | 300 | 0 | 0,91 |
| ÇKK 300-5 | 300 | 5 | 0,84 |
| ÇKK 300-10 | 300 | 10 | 0,90 |
| ÇKK 300-20 | 300 | 20 | 0,93 |
| ÇKK 400-0 | 400 | 0 | 0,58 |
| ÇKK 400-5 | 400 | 5 | 0,52 |
| ÇKK 400-10 | 400 | 10 | 0,56 |
| ÇKK 400-20 | 400 | 20 | 0,65 |

Üretilen beton örneklerinin su/çimento oranları incelendiğinde, dozaj yani çimento miktarı arttıkça, su/çimento oranının düştüğü gözlemlenmiştir. Ortalama su/çimento oranları 200, 250, 300 ve 400 dozlu betonlar için sırasıyla 1,33, 1,00, 0,89 ve 0,57 olarak belirlenmiştir. Bu durum dozaj arttıkça karışıma giren çimento miktarının artmasının beklenen bir sonucudur. Ayrıca, karışıma giren çimento miktarı arttıkça agrega miktarı azaldığından karışım suyu miktarı azalmış ve su/çimento oranları dozaj arttıkça azalmıştır.

Karışıma giren ÇKK miktarına bağlı olarak yoğurma suyu miktarının azalması beklenirken özellikle %10 ve %20 oranında ÇKK kullanılan konularda su miktarının arttığı belirlenmiştir. Bu artış, dökümler sırasında agreganın açık havada güneş ışınlarına maruz kalan alanda bulunması nedeniyle nem düzeltilmesi yapılmış olmasına karşın dökümlerinin sıcaklığının yüksek olduğu yaz döneminde yapılmış olması nedeniyle buharlaşmanın fazla olması sonucunda daha fazla su kullanılmasından kaynaklandığı düşünülmüştür.

4.1.2. Taze Beton Sıcaklıkları

Beton örnekleri üretilirken taze betonlarda sıcaklık ölçümleri yapılmış ve Çizelge 4.2’de verilmiştir. Elde edilen sonuçlardan görüldüğü gibi tüm dozajlar için karışıma giren ÇKK miktarı arttıkça beton sıcaklığı azalmıştır. Karışımda kullanılan ÇKK’nin çimentoya göre hidrasyon hızının daha düşük olması ısınmanın daha yavaş olmasına ve dolayısıyla taze betonun sıcaklığının az da olsa daha düşük olmasına neden olmuştur. Beton sıcaklığının 10 °C’nin altına düşmesi hidrasyonu yavaşlatmakta olup, beton dökümünün yapıldığı yerdeki çevre sıcaklığı da hidrasyon hızını etkileyen faktörlerden bir tanesidir (Topçu, 2006).

Çizelge 4.2. Taze beton sıcaklıkları

| Konu | Dozaj (kg/m ³) | ÇKK (%) | Sıcaklık (°C) |
|------------|----------------------------|---------|---------------|
| ÇKK 200-0 | 200 | 0 | 29 |
| ÇKK 200-5 | 200 | 5 | 28 |
| ÇKK 200-10 | 200 | 10 | 28 |
| ÇKK 200-20 | 200 | 20 | 26 |
| ÇKK 250-0 | 250 | 0 | 26 |
| ÇKK 250-5 | 250 | 5 | 26 |
| ÇKK 250-10 | 250 | 10 | 25 |
| ÇKK 250-20 | 250 | 20 | 25 |
| ÇKK 300-0 | 300 | 0 | 29 |
| ÇKK 300-5 | 300 | 5 | 28 |
| ÇKK 300-10 | 300 | 10 | 27 |
| ÇKK 300-20 | 300 | 20 | 25 |
| ÇKK 400-0 | 400 | 0 | 28 |
| ÇKK 400-5 | 400 | 5 | 28 |
| ÇKK 400-10 | 400 | 10 | 27 |
| ÇKK 400-20 | 400 | 20 | 27 |

4.2. Sertleşmiş Beton Deneyleri

4.2.1. Birim Ağırlık (BA)

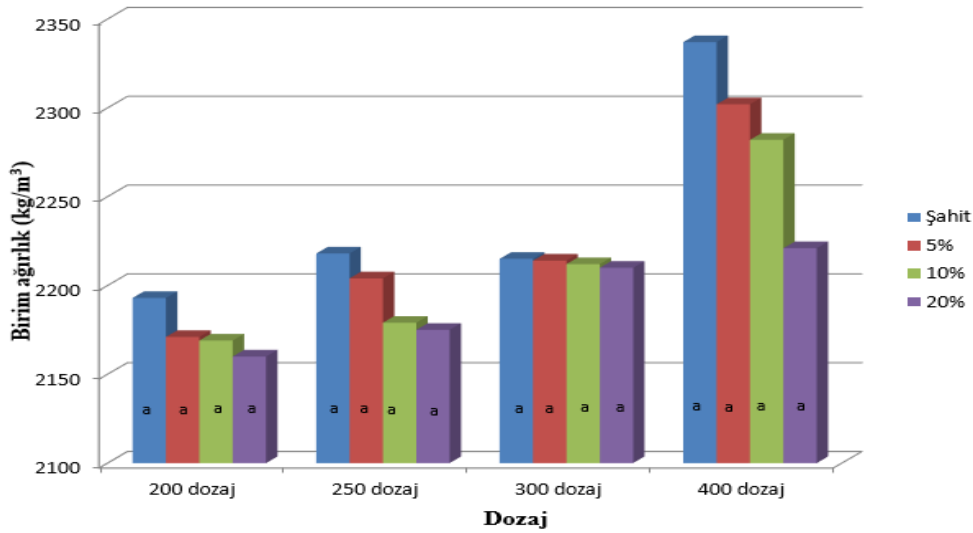
Araştırma kapsamında üretilen 28 günlük sertleşmiş beton örneklerinin farklı dozaj ve ÇKK yüzdesi için birim ağırlıkları Çizelge 4.3. ve Şekil 4.1’de verilmiştir. Genel olarak bakıldığında dozaj miktarı arttıkça birim ağırlıklar artmış ve en yüksek birim ağırlık ÇKK 400-0 konusunda 2337 kg/m³, en düşük ise ÇKK 200-20 konusunda 2160 kg/m³ olarak ölçülmüştür. Dozaja bağlı bu artış karışıma giren çimento miktarının artması ve çimentonun özgül ağırlığının agregaya göre daha yüksek olmasının doğal bir sonucudur. Karışımdaki çimento miktarının ve birim ağırlığın artması daha kompakt ve mukavim beton üretildiği anlamına gelmektedir.

Çizelge 4.3. Dozaj ve yüzde oranına göre birim ağırlık değişimi ve varyans analizi

| Birim Ağırlık (kg/m ³) | | ÇKK Oranı (%) | | | | P dozaj | P yüzde | P dozaj*%yüzde |
|---------------------------------------|-----|---------------|------|------|------|---------|---------|----------------|
| | | 0 | 5 | 10 | 20 | | | |
| Dozaj | 200 | 2193 | 2171 | 2169 | 2160 | 0,003 | 0,595 | 0,568 |
| | 250 | 2218 | 2204 | 2179 | 2175 | | | |
| | 300 | 2215 | 2214 | 2212 | 2210 | | | |
| | 400 | 2337 | 2302 | 2282 | 2221 | | | |

Karışıma giren ÇKK miktarına bağlı olarak birim ağırlıkların değişimi incelendiğinde tüm dozajlar için birim ağırlıkların ÇKK miktarı ile azaldığı ve 200 doz için 2193-2160 kg/m³ arasında, 250 doz için 2218-2175 kg/m³ arasında, 300 doz için 2215-2210 kg/m³ arasında ve 400 doz için 2337-2221 kg/m³ arasında değiştiği gözlenmiştir. Üretilen beton örneklerinde çimento yerine % 0, 5, 10 ve 20 oranlarında ÇKK kullanılması nedeniyle sertleşmiş beton birim ağırlıklarındaki azalma 200 doz için sırasıyla %1,00, %1,00 ve %1,50 oranında, 250 doz için sırasıyla %0,63, %1,75 ve %1,94 oranında, 300 doz için %0,04, %0,14 ve %0,22 oranında ve 400 doz için %1,50, %2,35 ve %4,96 oranlarında gerçekleşmiştir. Örneklerde kullanılan ÇKK'nin özgül ağırlığının çimentoya kıyasla daha düşük olması sebebiyle katkı ikamesiyle daha hafif betonların ve daha düşük birim ağırlığa sahip örneklerin üretildiği söylenebilir. Ayrıca dozajın artması karışıma giren ÇKK miktarı ile birim ağırlıktaki azalmanın daha fazla

olmasına neden olmuştur. Şişman, Gezer ve Kocaman (2011) tarafından farklı ÇKK yüzdeleri kullanılarak (%5, 10, 15, 20, 25 ve 30) üretilen betonlarda, ÇKK yüzdesinin artmasıyla beton birim ağırlıklarında azalma olduğu belirtilmiştir. Özocak (2021), farklı yüzdelerde (%0, 5, 10, 15 ve 20) kül kullanarak ürettiği betonlarda külün artmasıyla birlikte birim ağırlıklarda azalmanın olduğunu belirtmiş ve katkısız örneğin birim ağırlığının 2210 kg/m^3 iken %20 kül katkısıyla 1914 kg/m^3 seviyelerine düştüğünü göstermiştir. Yapılan Varyans analizi sonucunda (Çizelge 4.3), karışıma giren kül yüzdesine göre birim ağırlık değişimlerinde anlamlı farklılıklar görünmezken dozaja bağlı anlamlı farklılıklar bulunmuştur. Duncan sınıflandırmasında da (Şekil 4.1) tüm dozajlar için farklı kül oranlarına ait numunelerin birim ağırlıkları arasında anlamlı farklılıklar görülmemiştir.



Şekil 4.1. Duncan sınıflandırma analiz sonuçlarına göre sertleşmiş beton birim ağırlık değişimi

4.2.2. Su Emme

Üretilen 28 günlük sertleşmiş beton örnekleri üzerinde yapılan su emme deneyi sonuçları Çizelge 4.4 ve Şekil 4.2’de verilmiştir. Dozaja bağlı olarak tüm kül yüzdeleri için dozaj arttıkça su emme oranları azalmış ve istatistiksel olarak dozaj, kül yüzdesi ve dozaj*kül yüzdesi etkileşiminin su emme oranı üzerinde anlamlı farklılıklar oluşturduğu belirlenmiştir (Çizelge 4.4).

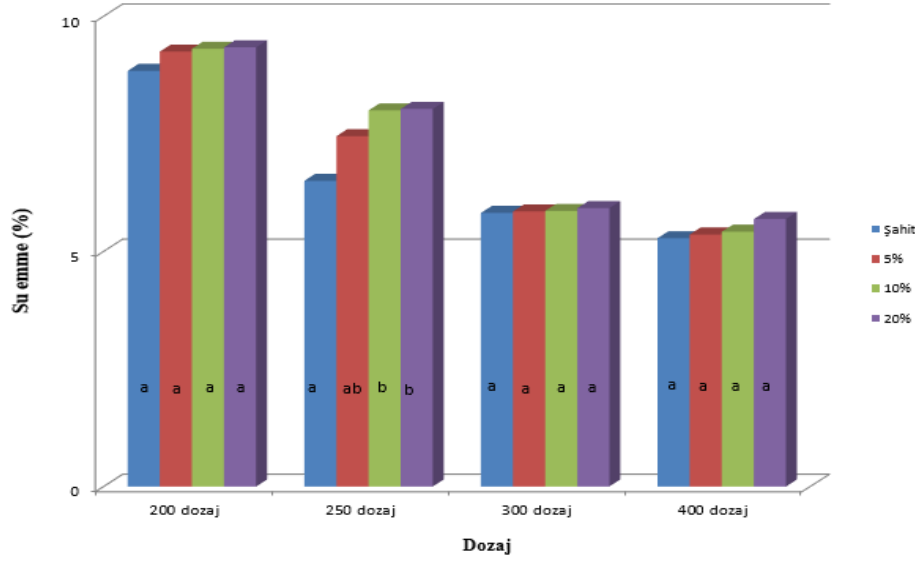
Çizelge 4.4. Dozaj ve yüzde oranına göre su emme ve varyans analizi

| Su Emme (%) | | ÇKK Oranı (%) | | | | P dozaj | P yüzde | P dozaj*%yüzde |
|-------------|-----|---------------|------|------|------|---------|---------|----------------|
| | | 0 | 5 | 10 | 20 | | | |
| Dozaj | 200 | 8,84 | 9,25 | 9,31 | 9,34 | 0,003 | 0,002 | 0,000 |
| | 250 | 6,5 | 7,45 | 8,00 | 8,03 | | | |
| | 300 | 5,82 | 5,85 | 5,86 | 5,92 | | | |
| | 400 | 5,28 | 5,36 | 5,42 | 5,69 | | | |

Şekil 4.2.'de görüldüğü gibi karışıma giren ÇKK miktarına bağlı olarak tüm dozajlar için su emme oranları artmış ve bu artışlar 250 dozlu beton örnekleri dışında istatistiksel olarak anlamlı bir farklılık oluşturmamıştır.

Karışıma giren %0, 5, 10 ve 20 oranlarındaki ÇKK miktarı için su emme oranları değişimi sırasıyla; 200 dozlu örneklerde %8,84-%9,34 aralığında, 250 dozlu örneklerde %6,50-%8,03 aralığında, 300 dozlu örneklerde %5,82-%5,92 aralığında, 400 dozlu örneklerde ise %5,28-5,69 aralığındadır. Kıvrak (2012) tarafından yapılan bir çalışmada, karışıma puzolan olarak giren kül miktarına bağlı olarak su emme oranı değişimleri incelenmiş ve benzer şekilde kül ikamesinin artmasıyla su emme miktarlarında artışlar olduğu kaydedilmiştir. Buna göre, su emme oranındaki artışın, külün özgül ağırlığının çimentoya göre daha düşük olmasından kaynaklandığını ileri sürmüştür.

Sonuçlar üzerinde yapılan Duncan sınıflandırması sonucunda 200, 300 ve 400 dozajlar için kül miktarına bağlı su emme oranlarındaki artışlar çok düşük miktarda gerçekleşmiş ve aynı grup içerisinde yer almışlardır. Ancak 250 dozaj için %0 ve %5 oranında ÇKK kullanılan örneklerin sonuçları ayrı grupta yer alırken %10 ve %20 ÇKK kullanılan örnekler aynı grupta yer almıştır.



Şekil 4.2. Duncan sınıflandırma analiz sonuçlarına göre dozaj ve kül oranına bağlı olarak su emme düzeyleri

4.2.3. Basınç Dayanımı

Farklı dozaj ve ÇKK oranlarında üretilen sertleşmiş beton örnekleri üzerinde 7, 28 ve 90 günlük kür süreleri sonunda 3 tekerrürlü yapılan basınç dayanımı deneyi sonuçları Çizelge 4.5 ve Şekil 4.3'te verilmiştir.

Elde edilen sonuçlar incelendiğinde basınç dayanımlarının, dozaj ve kür süresine bağlı olarak arttığı ve bu artışların yapılan varyans analizi sonucunda istatistiksel olarak önemli bulunduğu görülebilmektedir (Çizelge 4.5). Dozajın artması karışıma giren çimento miktarını artırdığı için basınç dayanımlarının artması beklenen bir sonuçtur. Benzer şekilde kür süresi de karışıma giren çimentonun hidrasyonunun zamana bağlı olarak devam etmesiyle dayanım artışını sağlayan doğal bir sonuçtur.

Üretilen beton örneklerinin basınç dayanımlarının ÇKK oranına bağlı değişimi incelendiğinde, düşük dozlu (200 doz) betonlarda 7, 28 ve 90 günlük tüm kür sürelerinde ÇKK miktarının artmasıyla beraber genel olarak basınç dayanımında kayıplar yaşandığı görülmüştür. Erken dayanımlar göz önüne alındığında, şahit numuneye kıyasla 7 günlük kür süresinde %5, %10 ve %20 ÇKK katkısı için basınç dayanımı sırasıyla %4,28, %20,57 ve %26,88 azalmıştır. Karışımındaki %5, %10 ve %20 ÇKK oranları için basınç dayanımları 28 günlük kür süresinde sırasıyla %3,44, %14,07 ve %14,67 oranda azalmıştır. Benzer durum 90 günlük dayanımda da görülmüş olup ÇKK oranına bağlı olarak basınç dayanım kaybı sırasıyla %7,25, %12,02 ve

%14,52 oranlarında gerçekleşmiştir. Ancak ÇKK 200 için yapılan Duncan testi sonucunda 7, 28 ve 90 günlerde farklı kül oranlarında tüm kür süreleri için anlamlı farklılık görülmemiştir.

Çizelge 4.5.Tüm dozajlar için yüzde oranı ve kür süresine göre basınç dayanımı sonuçlarının varyans analizi

| Dozaj | Kür süresi (gün) | ÇKK Oranı (%) | | | | p gün | p yüzde | p gün*yüzde |
|-------|------------------|---------------|-------|-------|-------|-------|---------|-------------|
| | | 0 | 5 | 10 | 20 | | | |
| 200 | 7 | 4,91 | 4,70 | 3,90 | 3,59 | 0,004 | 0,000 | 0,914 |
| | 28 | 6,68 | 6,45 | 5,74 | 5,70 | | | |
| | 90 | 7,99 | 7,41 | 7,03 | 6,83 | | | |
| 250 | 7 | 9,13 | 9,54 | 7,87 | 7,16 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| | 28 | 11,93 | 12,83 | 10,61 | 9,17 | | | |
| | 90 | 14,01 | 14,07 | 12,83 | 11,52 | | | |
| 300 | 7 | 14,40 | 12,88 | 10,10 | 7,91 | 0,000 | 0,000 | 0,989 |
| | 28 | 19,67 | 16,99 | 14,65 | 12,04 | | | |
| | 90 | 19,95 | 18,00 | 14,88 | 13,29 | | | |
| 400 | 7 | 28,45 | 26,23 | 24,81 | 19,61 | 0,000 | 0,000 | 0,410 |
| | 28 | 33,49 | 32,81 | 30,66 | 25,82 | | | |
| | 90 | 35,57 | 37,70 | 33,75 | 26,91 | | | |

Çalışmada üretilen 250 dozlu beton örneklerinin tüm kür süreleri için basınç dayanımlarının karışımında %5 ÇKK kullanılması durumunda arttığı, bu oranın üzerindeki ÇKK kullanımında ise azaldığı belirlenmiştir (Çizelge 4.5). Karışımında %5 kül kullanılarak üretilen beton örneklerinin 7, 28 ve 90 günlük kür süreleri için basınç dayanımlarındaki artışlar sırasıyla %4,49, %7,54 ve %0,42 seviyelerinde gerçekleşmiştir. Bu oranın üzerinde ÇKK kullanıldığı durumlarda basınç dayanım düşüşleri ise tüm kür süreleri için %17-8 arasında gerçekleştiği belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar istatistiksel olarak değerlendirildiğinde, 7 günlük kür süresi için farklı kül oranlarının basınç dayanımının değişimlerinin anlamlı farklılık oluşturmadığı, ancak 28. ve 90. gün için ise farklılıkların anlamlı olduğu belirlenmiştir. Çimento yerine ikame

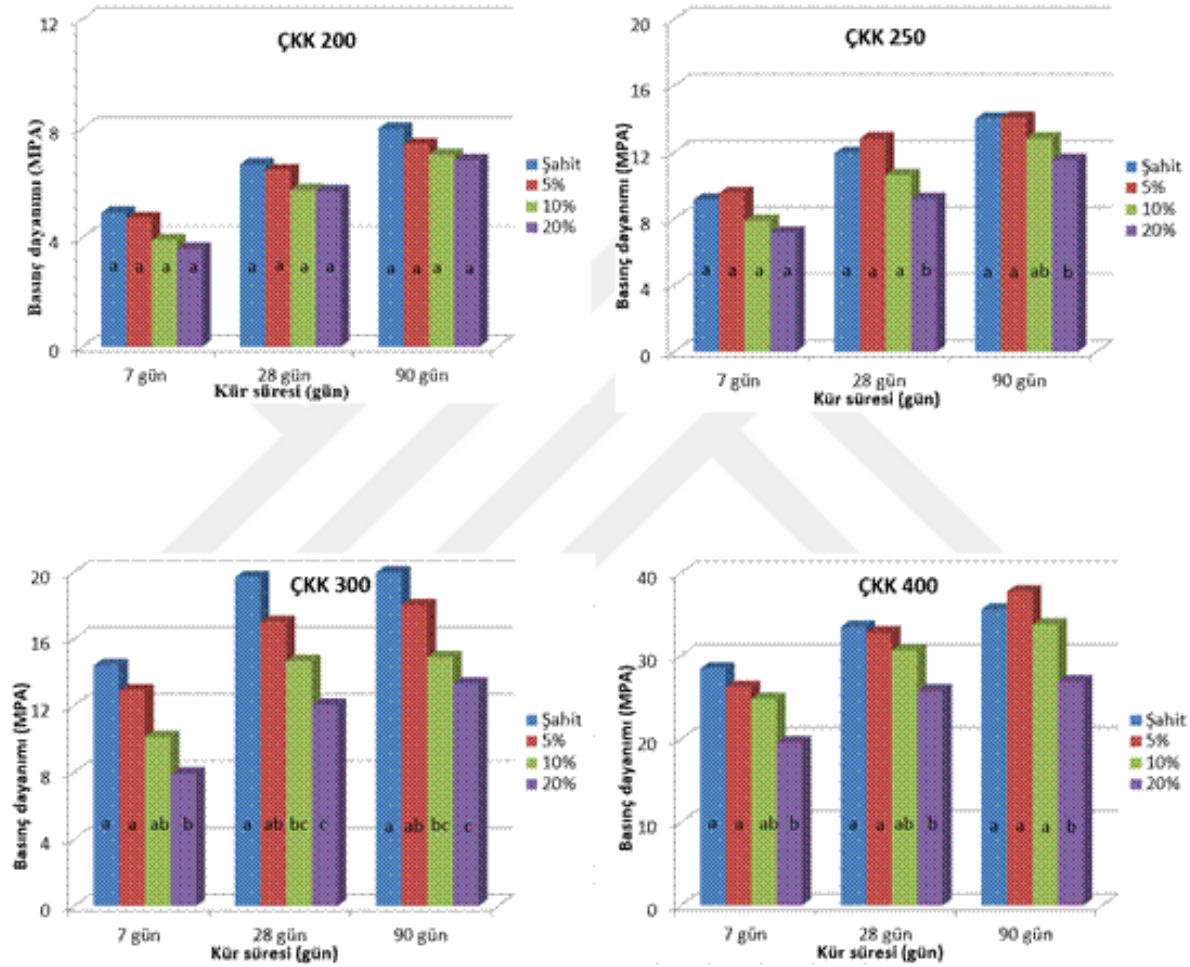
edilecek olan ÇKK miktarının %5-10 arasında olmasının en ideal miktarlar olarak görüldüğü ve %10'dan fazla yapılacak ikamenin ÇKK 250 için basınçta kayıplara sebep olduğu söylenebilir. Aziz, Aleem, Heikal ve Didamony (2004) tarafından yapılan çalışmada ağırlıkça %4, %8, %12 ve %16 oranlarında ÇKK ikamesiyle üretilen örneklerde, %8 ikamenin en iyi dayanım sonuçlarını verdiğini ve bu orandan fazla kullanılacak ÇKK'nın beton basınç dayanımını azalttığını belirtmişlerdir. Bu durumu da puzolonik çimento pastasının serbest kireç içeriğinin kül miktarının artmasıyla azalmasıyla ilişkilendirmiştir. Yapılan bir başka çalışmada (Yıldız vd., 2007) , %10 ÇKK içeren örneklerin 7, 14, 28 ve 90 günlük kür süreleri sonucunda % 5,71, %5,30, % 4,71 ve % 4,66 şahit numuneye göre basınç dayanımlarında artış olduğunu vurgulamış ve ÇKK %10 dan fazla miktara çıkmasıyla birlikte betonun basınç dayanımında azalma olduğunu ortaya koymuştur. ÇKK'nın basınç dayanımına yapmış olduğu katkı, ÇKK'dan gelen silikanın puzolanik etkisiyle birlikte ince taneli ÇKK'nın mikro dolgu yapmasıyla açıklanabilir.

Üretilen 300 dozlu beton örneklerinin basınç dayanımları incelendiğinde tüm kür süreleri için kül ikamesinin artmasıyla basınç dayanımının azaldığı gözlemlenmiştir. Azalma oranları % 5, % 10 ve % 20 katkı oranları için 7 günde %10,56-45,07 aralığında, 28 günde %13,62-38,79 aralığında, 90 günde % 9,77-33,38 aralığında olmuştur. Yapılan Duncan testi sonuçlarına göre 7, 28 ve 90 günlük kül süreleri için farklı kül oranlarının basınç dayanımı üzerinde oluşturduğu azalmanın anlamlı farklılık gösterdiği belirlenmiştir. Ayrıca kür süresinin artması, basınç dayanımlarını artırmıştır. Kür süresinin 7 günden 90 güne çıkması durumunda basınç dayanımındaki artışlar, %0, 5, 10 ve 20 kül oranları için sırasıyla %38,54, %39,75, %47,33 ve % 68,02 olarak gerçekleşmiştir. Erdoğan vd. (1999) yaptıkları çalışmada puzolan malzemelerin, klinkerin hidrasyonu ile birlikte Ca(OH)₂ ile tepkimeye girmesi neticesinde dayanıma zamanla olumlu etki yaptığını belirtmişlerdir.

Üretilen 400 dozlu betonlarda, ÇKK 300'e oldukça benzer bir dayanım sonucu ortaya çıkmıştır. Sadece ÇKK 400-5, 90 günlük dayanımda şahit numuneden bir miktar daha fazla basınç maruz kalarak kırılmıştır. Kür süresinin artması ÇKK 400 için de her örnekte basınçta artışlara sebep olmuştur. Kür süresinin 7 günden 90 güne kadar geçen zamanda örneklerdeki basınç artışı ÇKK 400-0 için %25,03, ÇKK 400-5 için %43,73, ÇKK 400-10 için %36,03 ve ÇKK 400-20 için %37,23'tür. .Puzolanik malzemelerin beton dayanımına katkısı daha çok geç dönemde ortaya çıkmaktadır. C-S-H jellerinin oluşması için gerekli silis ve alüminin külden gelmesiyle belirli kül yüzdelerine kadar dayanımda artışların olması olağan bir sonuçtur. Belirli

orandan fazla olacak şekilde betona katılan kül, C-S-H jeli oluşturabilmek için ortamda yeterli kalsiyum hidroksit bulamadığı ve külün bağlayıcılığının çimentodan düşük olmasından dolayı belirli miktar külden fazlasının betonda kullanılması dayanımı olumsuz etkileyebilmektedir (Erdoğan, 2007)

ÇKK 400 için yapılan Duncan testi sonucunda 7, 28 ve 90 günler için farklı kül oranlarının basınç dayanımında anlamlı farklılıklar görülmektedir.



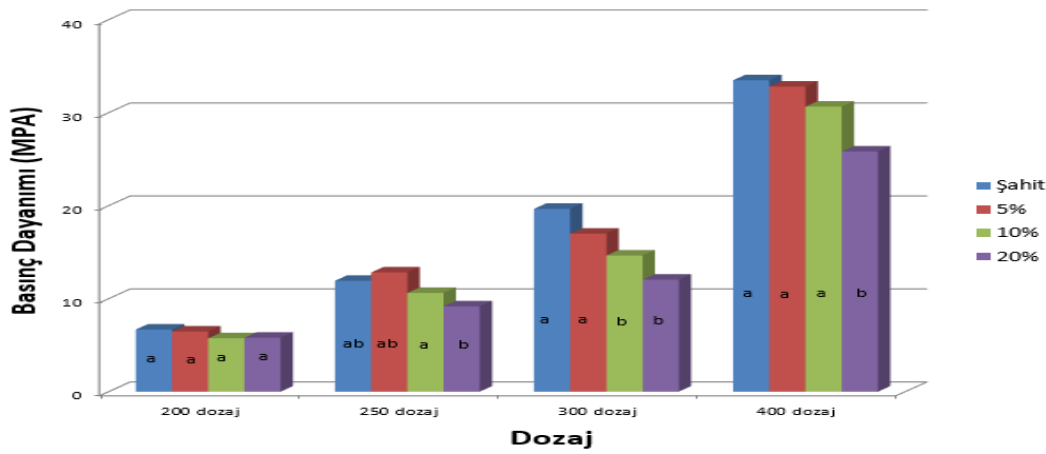
Şekil 4.3. Duncan sınıflandırma analiz sonuçlarına göre tüm dozajlar kül oranlarına ve kür süresine bağlı olarak basınç dayanımları

Sertleşmiş 28 günlük beton örneklerinin farklı dozaj ve kül yüzdeleri için basınç dayanımlarının değişimlerinin istatistiksel olarak değerlendirilmesi ve farklılıkların belirlenmesi amacıyla yapılan varyans analizi sonuçları Çizelge 4.6'da verilmiştir. Varyans analizi sonucunda dozaj, kül yüzdesi ve dozaj*kül yüzdesi etkileşiminin basınç dayanımında oluşturduğu değişimlerin anlamlı farklılık olduğu belirlenmiştir.

Çizelge 4.6. Dozaj ve yüzde oranına göre 28 günlük basınç dayanımı sonuçlarının varyans analizi

| Basınç Dayanımı (MPa) | | ÇKK Oranı (%) | | | | P dozaj | P yüzde | P dozaj*%yüzde |
|-----------------------|-----|---------------|-------|-------|-------|---------|---------|----------------|
| | | 0 | 5 | 10 | 20 | | | |
| Dozaj | 200 | 6,68 | 6,45 | 5,74 | 5,70 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| | 250 | 11,93 | 12,83 | 10,61 | 9,17 | | | |
| | 300 | 19,67 | 16,99 | 14,65 | 12,04 | | | |
| | 400 | 33,49 | 32,81 | 30,66 | 25,81 | | | |

Üretilen 28 günlük beton örneklerinin dozaj ve kül yüzdelerine göre değişen basınç dayanım sonuçlarının sınıflandırılması amacıyla yapılan Duncan sınıflandırma analiz sonuçları Şekil 4.4'te verilmiştir. Şekil 4.4'ten görülebildiği gibi 200 dozlu beton örneklerinde farklı kül oranlarının basınç dayanımları arasında anlamlı farklılık görülmemiş ve aynı grup içerisinde yer almıştır. Diğer dozajlar için ise kül oranlarına göre basınç dayanımları arasındaki farklılıklar anlamlı bulunmuştur. Basınç dayanımlarının 250 dozlu beton örnekleri için şahit ve %5 ÇKK ikameli konular aynı grupta yer alırken, %10 ve %20 ÇKK katkılı örnekler farklı gruplarda yer almıştır. Aynı sınıflandırma 300 dozlu beton örnekleri için yapıldığında, şahit ve %5 ÇKK ikameli konu bir sınıfta, %10 ve %20 ÇKK ikameli konular ise ayrı bir sınıf içerisinde yer almıştır. Dozajın en yüksek olduğu 400 dozlu örneklerde ise, sadece %20 ÇKK ikameli konu ayrı bir grupta sınıflandırılmıştır.



Şekil 4.4. Duncan sınıflandırma analiz sonuçlarına göre dozaj ve kül oranına bağlı olarak basınç dayanımları

4.2.4. Yarmada Çekme Dayanımı

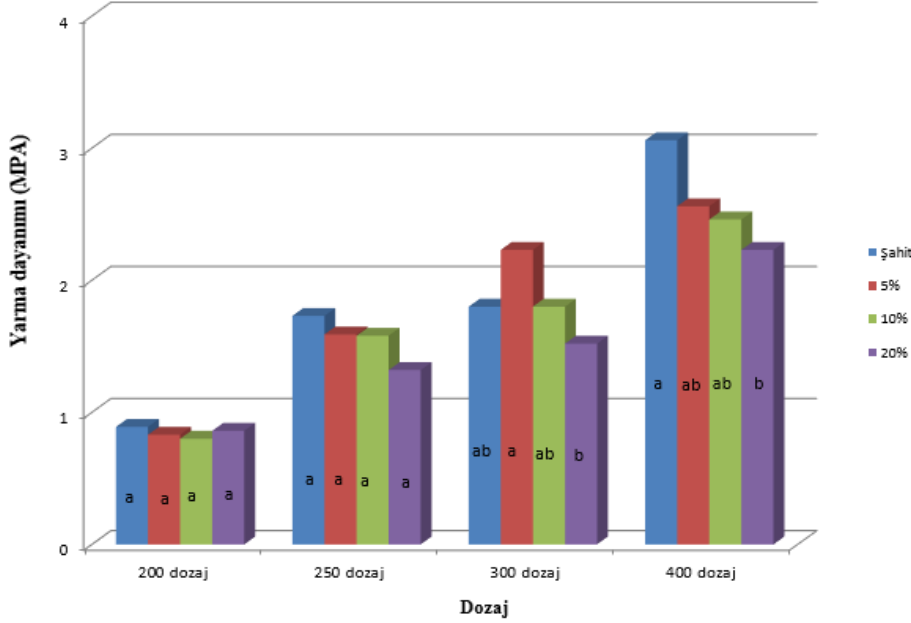
Farklı ÇKK katkı oranları ve dozajlarda üretilen sertleşmiş betonlar için 28 günlük kür süresi sonunda 3 tekerrürlü olarak yapılan yarmada çekme dayanımı deneyi sonuçları Çizelge 4.7’de verilmiştir. Yapılan varyans analizi sonucuna göre, dozaj, kül yüzdesi ve dozaj*kül yüzdesi etkileşimine göre basınç dayanımında anlamlı farklılık bulunmuştur.

Çizelge 4.7. Dozaj ve yüzde oranına göre yarma dayanımı sonuçlarının varyans analizi

| Yarma Dayanımı (MPa) | | ÇKK Oranı (%) | | | | P dozaj | P yüzde | P dozaj*yüzde |
|----------------------|-----|---------------|------|------|------|---------|---------|---------------|
| | | 0 | 5 | 10 | 20 | | | |
| Dozaj | 200 | 0,89 | 0,83 | 0,80 | 0,86 | 0,000 | 0,000 | 0,015 |
| | 250 | 1,73 | 1,59 | 1,58 | 1,32 | | | |
| | 300 | 1,80 | 2,23 | 1,80 | 1,52 | | | |
| | 400 | 3,06 | 2,56 | 2,46 | 2,23 | | | |

ÇKK 300-5’in ÇKK 300-20’ye kıyasla daha yüksek yarma dayanımına sahip olduğu ve ÇKK 300-20’de yarma dayanımında %31,84 azalma olduğu görülmüştür. ÇKK 300-5 örneklerinden elde edilen çekme dayanımı değerleri ÇKK-300 grubunda elde edilen en yüksek değer olup ÇKK 300-0’dan dahi yüksektir. Yapılan çalışmalarda farklı sonuçlara ulaşılması dikkat çekmektedir. Erdoğan (1997), artırılan kül katkısıyla birlikte yarmada çekme dayanımında azalmalar görüldüğünü belirtmiştir. Diğer taraftan, Yıldız vd. (2007) tarafından yapılan çalışmada 28 günlük eğilme dayanımında şahit numuneye kıyasla üretilen %10 kül içerikli numunelerin dayanımlarının 6,35 MPa’dan 6,38 MPa seviyesine yükseldiği raporlanmıştır. Buna ek olarak, Saraswathy ve Song (2007) tarafından yapılan bir diğer çalışmada farklı oranlarda %30’a kadar ÇKK kullanılarak üretilen betonların eğilme dayanımlarında şahit örneğe kıyasla %25’e kadar daha yüksek dayanımların elde edildiği gösterilmiştir. Bu durum sabit slump değeri göz önüne alınarak yapılan çalışmada karışıma konan su miktarının kül ile olan etkileşiminin olumlu yansıması olarak açıklanabilir. ÇKK 400 dozajda ise; ÇKK 400-0’ın ÇKK 400-20’ye göre daha yüksek yarma dayanımına sahip olduğu ve ÇKK 400-20’de yarma dayanımında %27,12 azalma olduğu görülmüştür.

Üretilen beton örneklerinin dozaj ve kül yüzdelere göre değişen yarmada çekme dayanımı sonuçlarının gruplandırılması amacıyla, Duncan sınıflandırması kullanılarak yapılan istatistiksel analiz sonuçları Şekil 4.5’de verilmiştir. ÇKK 200 ve ÇKK 250 dozajda farklı kül oranlarına ait örneklerin yarma dayanımları arasında anlamlı farklılık görülmezken ÇKK 300 ve ÇKK 400 için farklı gruplar oluşmuştur.



Şekil 4.5. Duncan sınıflandırma analiz sonuçlarına göre dozaj ve kül oranına bağlı olarak yarma dayanımları

4.2.5. Donma Çözünme

Normal kür uygulanan 28 günlük beton örneklerinin yöntem kısmında verilen yöntemde uygun olarak donma-çözünme çevrimi sonucunda elde edilen basınç dayanımları Çizelge 4.8’de verilmiştir.

Basınç dayanımları üzerinde yapılan Varyans analizi sonrasında kül yüzdesine ve dozaj* kül yüzdesi etkileşimine göre donma çözünme düzeylerinde anlamlı farklılık görülmezken; dozaj oran etkileşimine göre donma çözünme düzeylerinde anlamlı farklılık bulunmuştur.

Donma çözünme etkisine maruz bırakılan örneklerde dozaj bazında yapılan incelemelerde dozaj arttıkça dayanımın artması beklenen bir sonuçtur. Burada esas üzerinde durulması gereken husus örneklerin aynı dozaj içinde kül yüzdesi ile donma çözünme etkisi altındaki basınç dayanımı kayıplarıdır. ÇKK 200-0 ve ÇKK 200-20 için basınç dayanımları

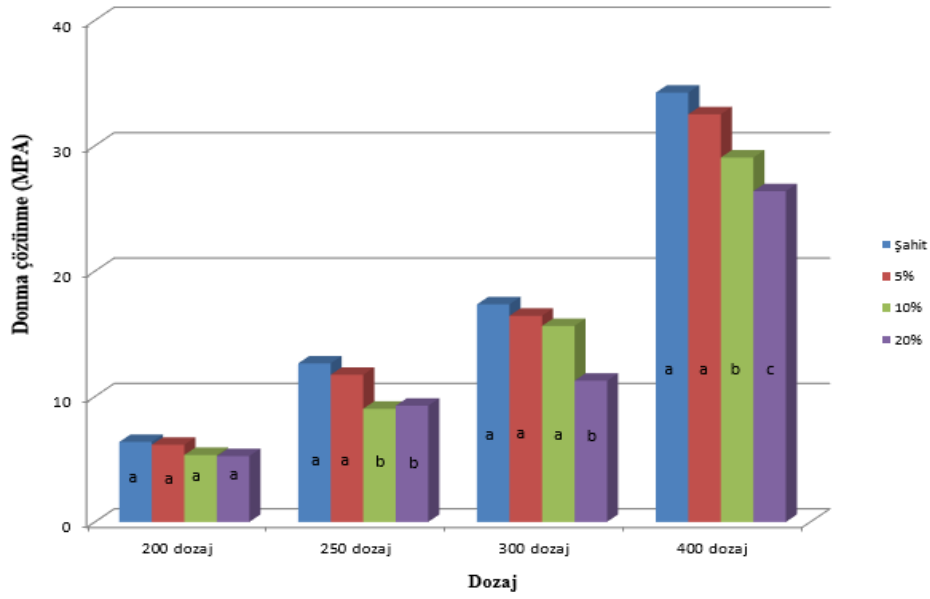
6,38 MPa ve 5,25 MPa'dır. Bu da basınç dayanım kaybının %17,7 seviyesinde olduğuna göstermektedir. Ekmekyapar ve Örüng (1993); Şişman, Kocaman ve Gezer (2008) donma çözünmeye maruz kalan betonların dayanımındaki kayıpların %20'ye kadar kabul edilebileceğini belirtmişlerdir. Yapılan çalışmada ÇKK 200 bu sınırın altında kaldığından kullanılabilir durumdadır. Diğer taraftan ÇKK 250, ÇKK 300 ve ÇKK 400 için %20 kül katkısı kullanılan örneklerde şahit betona kıyasla dayanım kayıpları sırasıyla %26,7, %35,1 ve %22,9 olup, dona maruz ve dayanıma önemli derecede gereksinim duyulan bölgelerde kullanılmasında ihtiyatlı olunması veya kullanılmaması değerlendirilmektedir.

Çizelge 4.8. Dozaj ve yüzde oranına göre donma-çözünme sonuçlarının varyans analizi

| Basınç Dayanımı (MPa) | | ÇKK Oranı (%) | | | | P dozaj | P yüzde | P dozaj*%yüzde |
|-----------------------|-----|---------------|-------|-------|-------|---------|---------|----------------|
| | | 0 | 5 | 10 | 20 | | | |
| Dozaj | 200 | 6,38 | 6,15 | 5,34 | 5,25 | 0,003 | 0,595 | 0,568 |
| | 250 | 12,64 | 11,73 | 9,02 | 9,27 | | | |
| | 300 | 17,35 | 16,44 | 15,63 | 11,26 | | | |
| | 400 | 34,24 | 32,51 | 29,06 | 26,38 | | | |

Tüm dozajlar için kül miktarı arttıkça su emme oranlarında artış olmakla birlikte, yine tüm dozajlar için kül miktarı arttıkça donma-çözünmeye maruz kalan betonlarda karışıma giren kül yüzdesinin artmasıyla basınç dayanımlarında düşmeler kaydedilmiştir. Bu durum beklenen bir sonuç olup kül miktarı betondaki boşluk miktarını ve su emmeyi artırmakta, aynı zamanda beton içinde hapsolan suyun donmasıyla betonda hacim genişlemesine sebep olarak basınç dayanımına negatif etkide bulunmaktadır.

Duncan sınıflandırması kullanılarak yapılan istatistiksel analiz sonuçları Şekil 4.6'da verilmiştir. ÇKK 200 örneklerinde anlamlı farklılık gözükmezken diğer tüm dozaj gruplarında kül yüzdesine bağlı olarak örneklerin farklı gruplarda yer aldıkları görülmektedir.



Şekil 4.6. Duncan sınıflandırma analiz sonuçlarına göre dozaj ve kül oranına bağlı olarak donma-çözünme dayanımları

4.2.6. Isı İletim

Örneklerin yalıtım özelliklerinin belirlenmesi amacıyla ısı iletim deneyleri yapılmıştır. Üretilen örneklerin, dozajlarına ve kül yüzdesine göre de ısı iletim düzeyleri karşılaştırılmış ve iletkenlik düzeyleri Çizelge 4.9’da verilmiştir. Varyans analizi sonrasında dozaj, kül yüzdesi ve dozaj* kül yüzdesi oran etkileşimine göre basınç dayanımında anlamlı farklılık bulunmuştur.

Çizelge 4.9. Numunelerin dozaj ve yüzde oranına göre ısı iletimi sonuçlarının varyans analizi

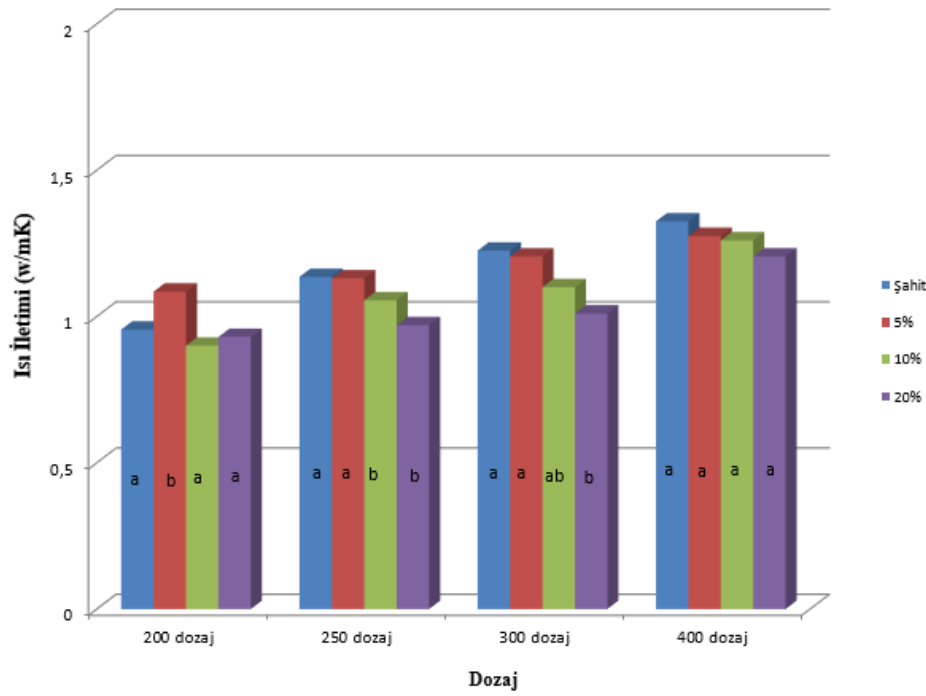
| Isı İletimi (W/mK) | | ÇKK Oranı (%) | | | | p dozaj | p yüzde | p dozaj*yüzde |
|--------------------|-----|---------------|------|------|------|---------|---------|---------------|
| | | 0 | 5 | 10 | 20 | | | |
| Dozaj | 200 | 0,96 | 1,09 | 0,90 | 0,93 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| | 250 | 1,14 | 1,13 | 1,06 | 0,97 | | | |
| | 300 | 1,23 | 1,21 | 1,10 | 1,01 | | | |
| | 400 | 1,33 | 1,28 | 1,26 | 1,21 | | | |

ÇKK 200-5'te gözlenen ısı iletimi katsayısı ÇKK 200-0, ÇKK 200-10 ve ÇKK 200-20'de gözlenenden daha fazladır. Isı iletim katsayısında ÇKK 200-0 ile ÇKK 200-5 arasındaki %13,54 artış beklenmeyen bir durum olup deneysel yöntemden veya deney koşullarından kaynaklanan bir hata olarak değerlendirilmiştir.

ÇKK 250-0 ile ÇKK 250-20 arasındaki azalma %14,91 oranında olup %20 kül içeren örneklerdeki ısı iletimi daha azdır. Benzer şekilde ÇKK 300-0 ile ÇKK 300-20 arasındaki azalma %17,89 oranındadır ve %20 kül içeren örnekler daha az ısı iletimine sahiptir. ÇKK 400-0 ile ÇKK 400-20 arasında da benzer bir eğilim olmakla beraber diğer dozajlara kıyasla yüzde bazında ısı iletim azalması nispeten daha az olup %9,02 seviyelerindedir.

ÇKK 250, ÇKK 300 ve ÇKK 400 için genel olarak kül miktarının artmasıyla iletimde azalmalar olduğu söylenebilir. Bu dozajdaki çalışmalarda yalıtımın öncelikli olduğu elemanlar için üretilecek betonlarda %20 ÇKK kullanımının önerilebileceği söylenebilir. Özocak (2021) tarafından kül kullanılarak yapılan çalışmada %20 kül katkılı örneklerin diğer katkı yüzdelere kıyasla (%5, %10 ve %15) en küçük ısı iletim değerine sahip olduğu sonucuna ulaşılmış ve yalıtım açısından kullanılabilir örnek sınıfı olduğu belirtilmiştir. Isı iletim katsayısı betondaki boşluk miktarına bağlı olarak değişmektedir ve boşluk miktarı arttıkça iletimin azalması da beklenen bir sonuçtur. Betonda karışıma giren kül miktarı da genel olarak betondaki boşluk miktarını artırma eğiliminde olmasıyla bu durum açıklanabilir.

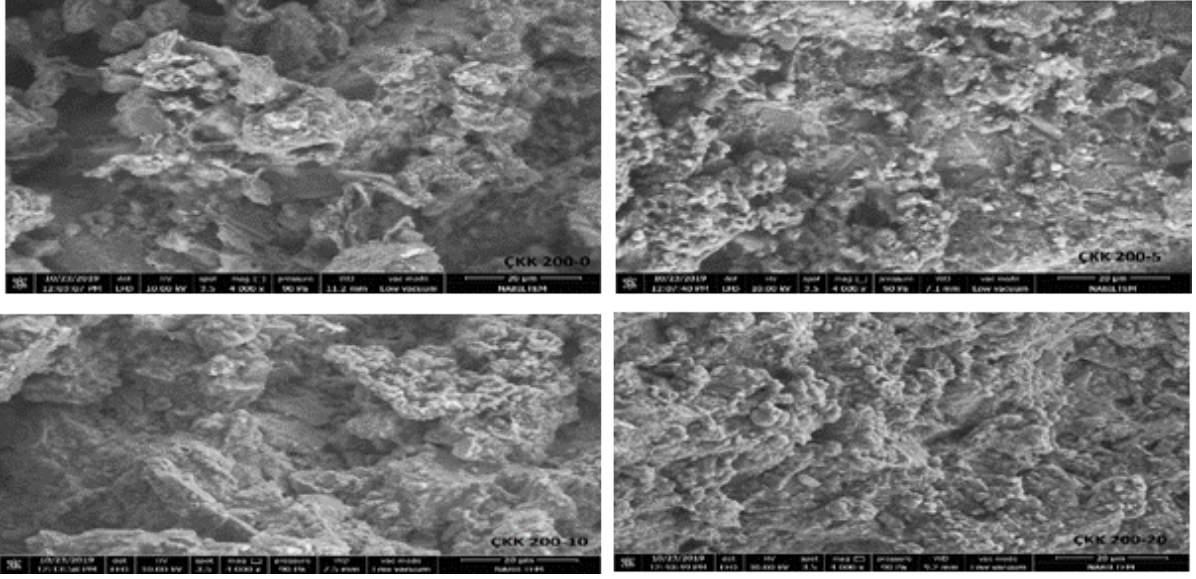
Isı iletimi için Duncan sınıflandırması kullanılarak yapılan istatistiksel analiz sonuçları Şekil 4.7'de verilmiştir. ÇKK 400'de farklı kül oranlarına ait numunelerin ön yüz ısı iletimi düzeyleri arasında anlamlı farklılık görülmezken, diğer tüm dozajlar kendi içinde farklı gruplar oluşmuştur.



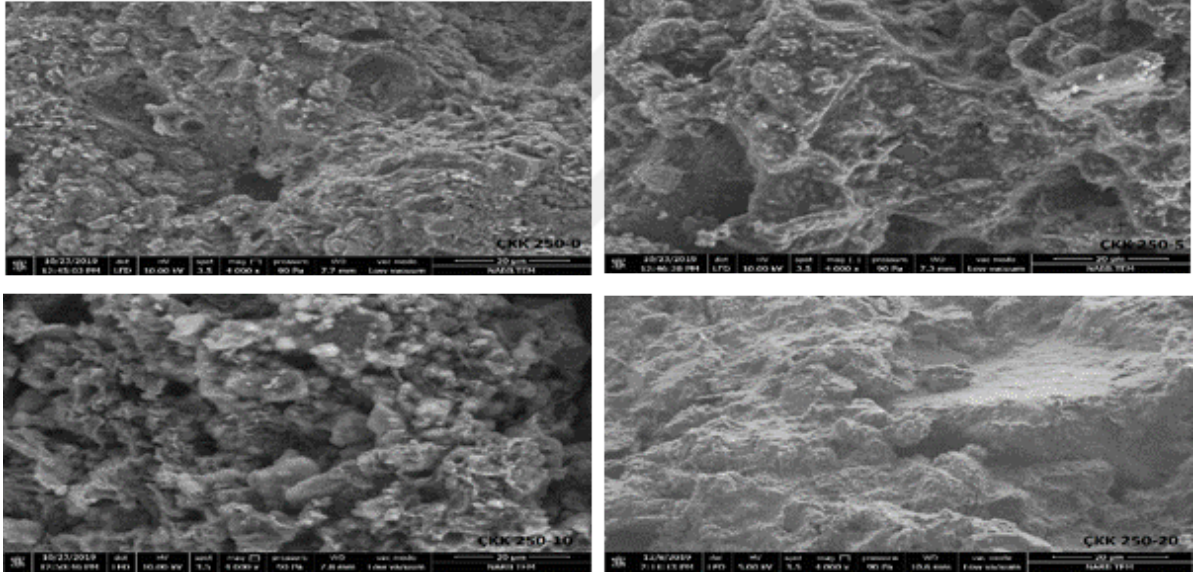
Şekil 4.7. Duncan sınıflandırma analiz sonuçlarına göre dozaj ve kül oranına bağlı olarak ısı iletim sonuçları

4.2.7. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Mikro Yapı incelemesi

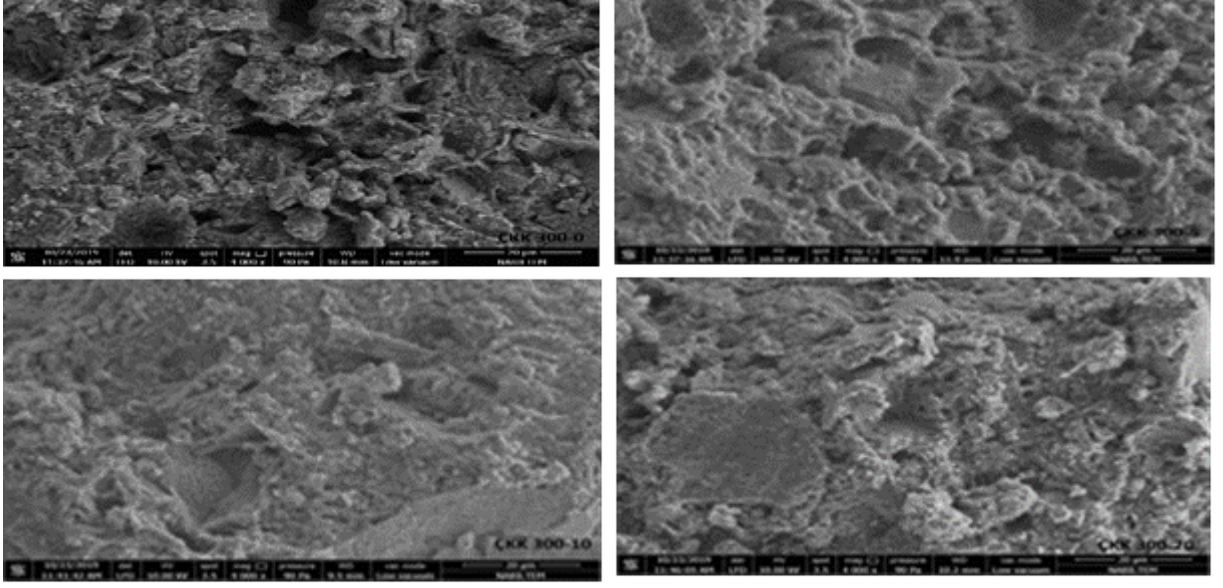
Farklı dozajlarda üretilen beton örneklerinin mikro yapı incelemesi amacıyla farklı dozaj ve kül oranlarında üretilmiş ve 28 günde basınç dayanımı testinde kırılmış beton örneklerinden çekilen SEM görüntüleri Şekil 4.8, 4.9, 4.10 ve 4.11’de verilmiştir. Üretilen tüm betonlarda agrega ile hidrate olmuş hamur arasında güçlü bağ kurulduğu görülmektedir. Bu bağın çimentonun nispi olarak fazla kullanıldığı dozajı yüksek örneklerde daha yoğun ve sıkı olduğu gözlemlenmiştir. Kırılan örneklerden alınan görüntülerde çimentonun hidrate olmasıyla oluşan kalsiyum silikat hidrat (C-S-H Jeli) ve ettrenjit olarak adlandırılan ince kristallere sahip olan kalsiyum sülföalüminatın oluştuğu anlaşılmaktadır. C-S-H oluşumu örneklerde bulunan ÇKK içeriğinde yer alan silis ile arttığı söylenebilir.



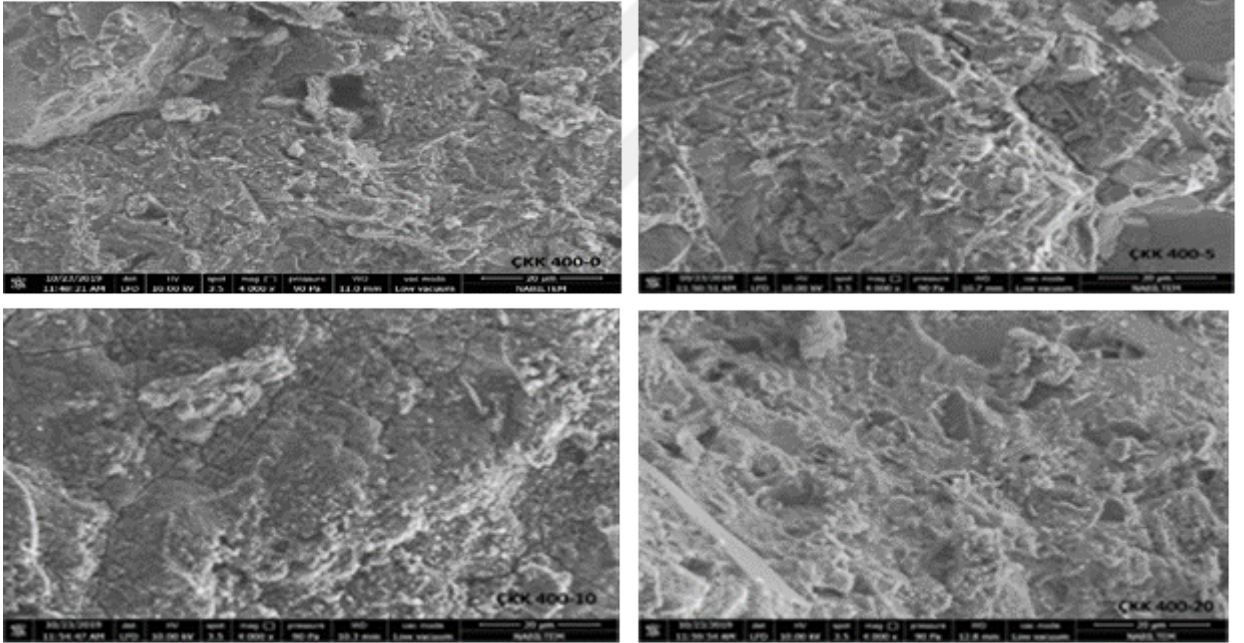
Şekil 4.8. ÇKK 200 SEM görüntüleri



Şekil 4.9. ÇKK 250 SEM görüntüleri



Şekil 4.10. ÇKK 300 SEM görüntüleri



Şekil 4.11. ÇKK 400 SEM görüntüleri

4.2.8. Maliyet Analizi

Kullanılan ÇKK ile çimento ikamesinin maliyet açısından getireceği kazanımları belirlemek amacıyla maliyet hesabı yapılmıştır. Tüm dozajlar için tüm ÇKK ikame oranlarının kullanılmasıyla üretilen betonlar hiç katkı kullanılmadan üretilen betonlarla maliyet açısından kıyaslanarak, ne kadarlık bir ekonomi sağlandığı hesaplanmıştır. Hesaplama yapılırken

malzemelerin fiyatları Çevre ve Şehircilik Bakanlığı'na ait 2021 Malzeme Birim Fiyat listesinden (Anonim, 2021-a) alınan ve Çizelge 4.10'da verilen değerler kullanılmıştır.

Çizelge 4.10. Kullanılan malzeme birim fiyatları

| | Kaba Agregası (TL/m ³) | İnce Agregası (TL/m ³) | Çimento (TL/ton) | Su (TL/ton) |
|-------------------|--|--|----------------------------|-----------------------|
| Birim Fiyatı (TL) | 32,5 | 32,5 | 270 | 9,05 |
| Poz No | 10.130.1003 | 10.130.1006 | 10.130.1201 | 10.130.9991 |

Öncelikle çalışma kapsamında üretilen her konuda 1 m³ beton için kullanılan malzeme miktarları belirlenmiş daha sonra bu malzemelerin birim maliyetleri hesaplanmış ve toplam maliyet bulunmuştur. Çizelge 4.11'de çalışma konularına göre 1 m³ beton dökümünde kullanılan malzeme miktarları, maliyetleri ve çimento yerine kül kullanımının sağladığı kazanç verilmiştir.

Tablo incelendiğinde; yüksek dozajlı imalatlarda sağlanan maddi kazancın düşük dozajlı imalatlara kıyasla yüzde bazında daha fazla olduğu görülmektedir. ÇKK 200-5 için yüzde bazında sağlanan ekonomik kazanç %3,36 iken ÇKK 250-5 için %3,65, ÇKK 300-5 için 3,88 ve ÇKK400-5 için %4,20 mertebesindedir.

Betondaki en yüksek maliyetin çimento olduğu düşünüldüğünde, yüksek dozajlı betonlarda kullanılan çimento miktarı düşük dozaja kıyasla daha fazladır. ÇKK ile yer değiştiren çimento miktarı yüksek dozajda daha fazla miktarda olduğu için, toplam maliyetin yüksek dozajlı betonda dozajı düşük olana kıyasla daha kazançlı olması beklenen sonuçtur. Üretilen tüm %20 ikameli örneklerde mali açıdan elde edilen kazanç miktarı %13,45 ve üzerine ulaştığı görülmekte olup bu oldukça yüksek sayılabilecek bir ekonomik getiri olarak düşünülebilir.

Yapılan çalışma sonucunda genel olarak %10 ÇKK ikamesi betonun özelliklerinde çok büyük olumsuz etkiler oluşturmadığı gözlemlenmiştir. Tüm dozajlar için %10 ikamesi yapıldığında; %8,39 (400 dozaj) ile %6,73 (200dozaj) aralığında daha ekonomik beton üretmek mümkün olabilmektedir. Dayanımın çok fazla gerekli olmadığı; tesviye, yalıtım, sıva vb. gibi uygulamalarda ÇKK ikamesinin %20 olarak kullanılmasıyla, bu ekonomik kazanım daha da artabilecektir.

Çizelge 4.11. Üretilen 1 m³ beton için mali kazanç

| Konu | Dozaj | Malzeme Miktarı (Kg) | | Maliyet (TL) | Mali Kazanç (%) |
|------------|-------|----------------------|------|--------------|-----------------|
| | | Çimento | Kül | | |
| ÇKK 200-0 | 200 | 200 | 0 | 81,25 | 0,00 |
| ÇKK 200-5 | 200 | 190 | 10 | 78,55 | 3,36 |
| ÇKK 200-10 | 200 | 180 | 20 | 75,85 | 6,73 |
| ÇKK 200-20 | 200 | 160 | 40 | 70,45 | 13,45 |
| ÇKK 250-0 | 250 | 250 | 0 | 93,60 | 0,00 |
| ÇKK 250-5 | 250 | 237,5 | 12,5 | 90,23 | 3,65 |
| ÇKK 250-10 | 250 | 225 | 25 | 86,85 | 7,31 |
| ÇKK 250-20 | 250 | 200 | 50 | 80,10 | 14,61 |
| ÇKK 300-0 | 300 | 300 | 0 | 105,95 | 0,00 |
| ÇKK 300-5 | 300 | 285 | 15 | 101,90 | 3,88 |
| ÇKK 300-10 | 300 | 270 | 30 | 97,84 | 7,75 |
| ÇKK 300-20 | 300 | 240 | 60 | 89,75 | 15,51 |
| ÇKK 400-0 | 400 | 400 | 0 | 130,66 | 0,00 |
| ÇKK 400-5 | 400 | 380 | 20 | 125,26 | 4,20 |
| ÇKK 400-10 | 400 | 360 | 40 | 119,86 | 8,39 |
| ÇKK 400-20 | 400 | 320 | 80 | 109,06 | 16,78 |

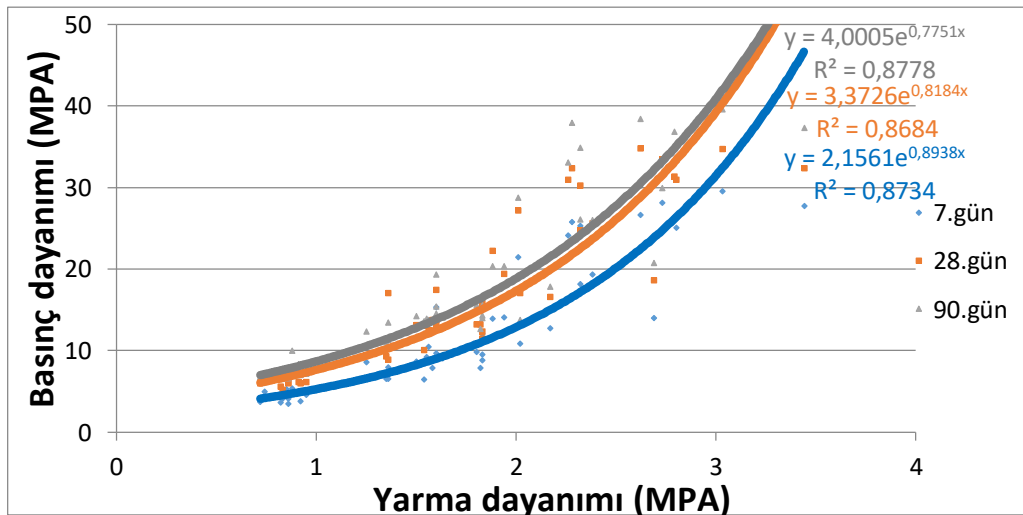
Bu maliyet analizinde malzemelerin nakliye bedelleri göz önüne alınmamıştır. Bu anlamda, gerek betonda kullanılan malzemelerin temini gerekse ÇKK temini ve imalatın yapılacağı alana olan uzaklıklarının önem arz ettiği bilinmektedir. Burada önemli olan husus, betonda kullanılan tüm malzemelerin maliyetleri ve nakliye bedelleri olmasına karşın, kullanılan ÇKK için sadece nakliye bedeli söz konusudur. Diğer taraftan kullanılan ÇKK tamamen atık konumunda olduğundan, çevreye vereceği potansiyel zararların azaltılması anlamında da oldukça avantajlı bir malzeme olarak gözükmektedir.

Son olarak günümüzde puzolanlar çimento üretimi esnasında kullanılmaktadır. Bu şekilde sürekli ve sürdürülebilir imalat yapılmasıyla atık üründen sağlanan mali kazanımın daha da artabileceği söylenebilir. Benzer şekilde, çimento üretimi esnasında ÇKK'nın direk kullanılabilirliğinin olması puzolanik çimento üretimi için önemli bir yaklaşım olabilir.

4.2.9. ÇKK Beton Özelliklerinin Karşılaştırılması

Çalışma kapsamında üretilen beton örneklerinin özellikleri arasındaki ilişkilerin belirlenmesi için basınç dayanımı-yarma dayanımı, basınç dayanımı-su/çimento oranı, basınç dayanımı-donma çözünme dayanımı arasında regresyon analizi yapılmış ve sonuçlar Şekil 4.12, Şekil 4.13 ve Şekil 4.14'de verilmiştir. Değişkenler arasındaki ilişkiyi göstermek için Korelasyon katsayısı belirlenmiştir.

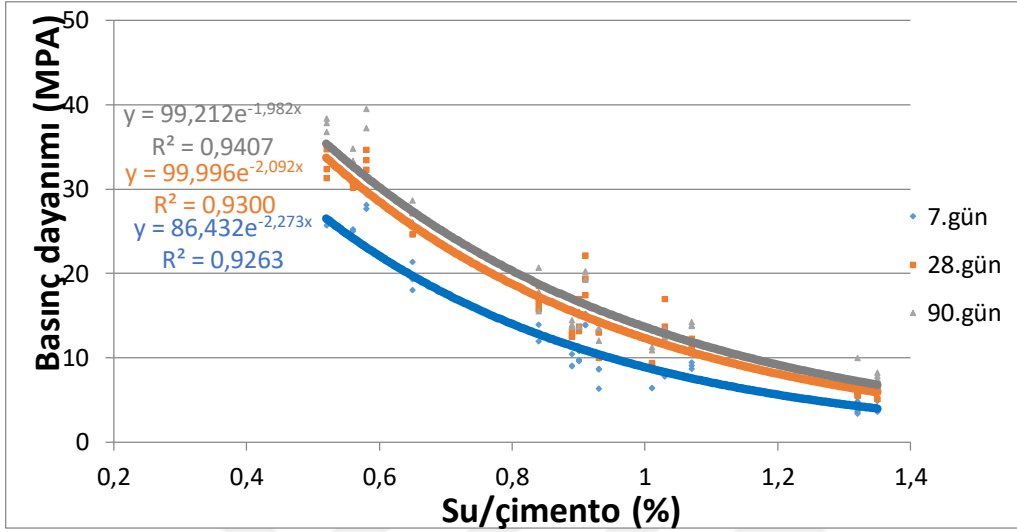
Şekil 4.12 incelendiğinde, basınç dayanımı ve yarma dayanımı arasındaki korelasyon katsayısının 7 gün için 0,8734, 28 gün için 0,8684 ve 90 gün için 0,8778 olduğu görülmektedir. Bu sonuçlar ile betonda basınç dayanımı ve yarma dayanımı arasında bir ilişkinin olduğu söylenebilir. Ancak, korelasyon katsayısı değerlerinin (R^2 değeri) her ne kadar 1'e çok fazla yaklaşmamış olsa dahi basınç dayanımı ve yarma dayanımı arasında bir ilişkinin olduğunu göstermektedir. Kür süresi göz önüne alındığında her üç değer de birbirine yakın olmasından dolayı kür süresinin bu ilişki için çok fazla önem teşkil etmediği anlaşılmaktadır.



Şekil 4.12. ÇKK betonların basınç ve yarma dayanımı arasındaki ilişki

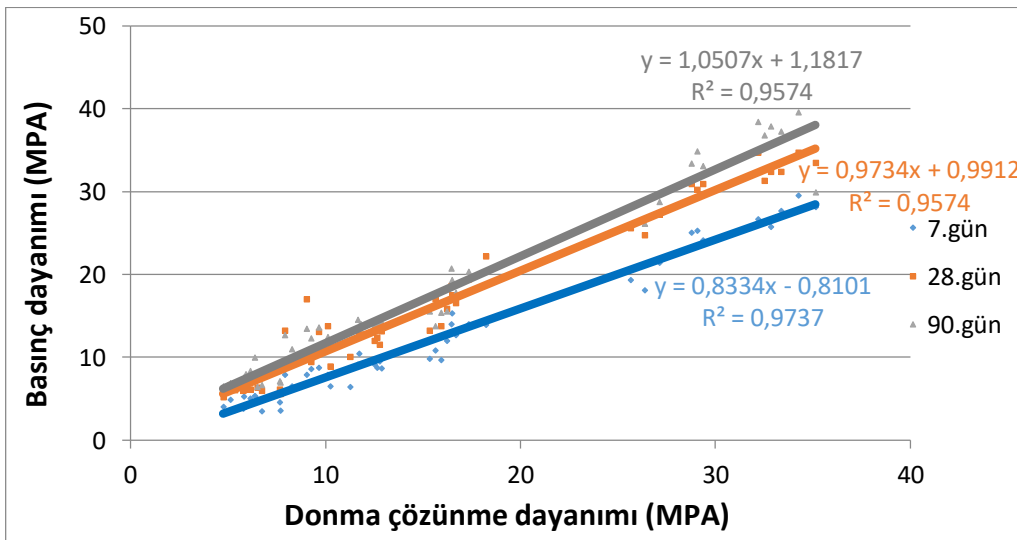
Basınç dayanımı ve su/çimento arasındaki ilişki Şekil 4.13'te verilmiştir. Korelasyon katsayısının 7 gün için 0,9263, 28 gün için 0,9300 ve 90 gün için 0,9407 olduğu görülmektedir.

Bu sonuçlar ile betonda basınç dayanımı ve su/çimento arasında ilişkinin olduğu söylenebilir. Ancak, değerler 0,93-0,94 arasında olduğu için çok kuvvetli bir ilişki olduğundan bahsetmek söz konusu değildir. Kür süresi göz önüne alındığında her üç değer de birbirine yakın olduğu görülmekte olup, lineere en yakın ilişkinin 90 günlük örneklerde olduğu görülmüştür.



Şekil 4.13. ÇKK betonların basınç dayanımı ve su/çimento miktarları arasındaki ilişki

Basınç dayanımı ve donma çözünme dayanımı arasındaki ilişki Şekil 4.14'te verilmiştir. Korelasyon katsayısının 7 gün için 0,9737, 28 gün için 0,9574 ve 90 gün için 0,9574 olduğu görülmektedir. Bu sonuçlar ile betonda basınç dayanımı ve donma çözünme dayanımı arasında lineer bir ilişkinin olduğu söylenebilir. Bu lineer etkileşimin en fazla olduğu kür süresi 7 günlük sürede oluşmaktadır.



Şekil 4.14. ÇKK betonların basınç dayanımı ve donma çözünme dayanımı arasındaki ilişki

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Günümüz dünyasında önemli miktarlarda üretimi yapılan pirincin üretimi esnasında, ürünün gıda olarak tüketilemeyen bölümü olan kabuk kısmı atık olarak ortaya çıkmaktadır. Birçok ülkede pirinç kabukları yakıt olarak kullanılmakta olup bu durum atığın atığı şeklinde oluşan çeltik kavuzu külünü oluşturmaktadır. Doğada insan eliyle oluşan bu külün, dünyadaki önemli yapı malzemelerinin en önemlileri arasında yer alan betonun üretiminde puzolan olarak çimento yerine kullanılması amacıyla yapılan bu çalışmada, farklı kül ikameleri ve farklı beton dozajları dikkate alınarak elde edilen betonların fiziksel ve kimyasal özellikleri aşağıda sunulmuştur.

Sertleşmiş betonda genel olarak dozaj miktarı arttıkça birim ağırlıkta artma gözlenmiştir. Tüm örnek setleri göz önüne alındığında, en yüksek BA değeri ÇKK 400-0, en düşük BA değeri ÇKK 200-20 için elde edilmiştir. Kül yüzdesine göre dozajlar kendi içinde nazara alındığında, kül miktarının artmasıyla BA değerlerinde azalma eğilimi olduğu tespit edilmiştir. ÇKK 400 için %20 kül ikamesi şahit örneğe kıyasla %4,96 oranında BA'da azalma oluşturmuş ve özellikle dozajı yüksek mukavemetli betonların kullanılması gereken tarımsal yapılarda ölü yükün azaltılması bakımından olumlu bir etkinin oluşacağını göstermiştir.

Üretilen betonların dozaj miktarı arttıkça su emme miktarlarında azalmalar belirlenmiştir. Tüm dozajlar için ikame yüzdelерinin artmasıyla su emme de hafif bir artış olduğu söylenebilir. Ancak ÇKK 300 ve ÇKK 400 örneklerinde kül yüzdesinin artması su emme miktarını oldukça az artırmış ve külün artması su emme miktarını neredeyse hiç etkilememiştir.

200 dozlu betonlarda genel olarak ÇKK miktarının artmasıyla, basınç dayanımında azalmalar oluşmuştur. ÇKK 250 için 7, 28 ve 90 günlük kür süreleri için en yüksek basınç dayanımı ÇKK 250-5 örneklerinden elde edilmiştir. Bu durum ÇKK 250 için kullanılması en ideal kül yüzdesi hakkında önemli fikir vermekte olup bu oran %5 ila %10 arasında olduğu söylenebilir. Karışıma giren % 5 ÇKK katkılı örneklerin basınç artışı şahit numuneye kıyasla 7, 28 ve 90 gün için sırasıyla %4,49, %7,54 ve %0,42 seviyelerinde olmuştur. ÇKK'nın basınç dayanımına yapmış olduğu olumlu katkı, ÇKK'dan gelen silikanın puzolanik etkisiyle ince taneli ÇKK'nın mikro dolgu yapmasıyla açıklanabilir. ÇKK 300 grubunda tüm kür süreleri için kül miktarının artmasıyla basınç dayanımlarında azalmalar gözlenmiştir. Diğer taraftan kür süresinin artmasıyla ÇKK 300 örneklerinin tamamında basınç artışları oluşmuştur. ÇKK 400,

ÇKK 300'e benzer basınç dayanımı performansı ortaya koymuştur. Sadece ÇKK 400-5'in 90 günlük dayanımı şahit numuneden biraz daha fazla olmuştur. Kür süresinin artması her örnekte basınç dayanımını olumlu etkilemiş ve 7-90 gün arasında geçen sürede örneklerdeki basınç artışı ÇKK 400-0 için %25,03, ÇKK 400-5 için %43,73, ÇKK 400-10 için %36,03 ve ÇKK 400-20 için %37,23 seviyesindedir.

ÇKK 300-5 örneklerinden elde edilen yarmada çekme dayanımı değerleri ÇKK -300 grubunda elde edilen en yüksek değer olup ÇKK 300-0'dan da yüksektir. ÇKK 200 ve ÇKK 250 dozajda farklı kül oranlarına ait numunelerin yarma dayanımları arasında anlamlı farklılık görülmemiştir. ÇKK 400 dozajda ise; ÇKK 400-0'ın ÇKK 400-20'ye göre daha yüksek yarma dayanımına sahip olduğu ve ÇKK 400-20'de yarma dayanımında %27,12 azalma olduğu gözlenmiştir.

Sonuçlar donma çözünme etkisine maruz kalan betonların dayanım kayıpları açısından değerlendirildiğinde, şahit numuneye kıyasla en az basınç kaybı %20 kül katkısı için ÇKK 200 örneklerinde gözlenmiştir ve %17,7 oranında dayanımda azalma meydana gelmiştir. Bu değer, Şişman vd., (2008) ve Ekmekyapar ve Örüng (1993) çalışmalarında belirtmiş oldukları kabul edilen sınır değer olan %20'nin altında kalması açısından donma çözünmeye maruz kalan bölgelerde yapılacak yapı elemanları için uygun görülmektedir. Ancak, ÇKK 250, ÇKK 300 ve ÇKK 400 %20 kül ikamesi için dayanım kayıpları sırasıyla %26,7, %35,1 ve %22,9 olduğundan ve sınırın üzerinde kalmalarından dolayı sıcaklık farkının çok fazla olduğu coğrafyalarda kullanılmasında dikkatli olunması sonucuna varılmıştır.

Isı iletkenliğinin belirlenmesi amacıyla yapılan çalışmadan elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, genel olarak kül miktarının artmasıyla ısı iletkenliğinde azalmalar olduğu söylenebilir. Yalnız ÇKK 200-5 te gözlenen ısı iletimi ÇKK 200-0, ÇKK 200-10 ve ÇKK 200-20'de gözlenenenden daha fazladır. ÇKK 250, ÇKK 300 ve ÇKK 400 için kül miktarının artmasıyla iletimde azalmalar gözlemlendiğinden, yalıtım parametresi göz önüne alınarak yapılan bu dozajlardaki üretimlerde, %20 ikamenin en iyi sonucu vereceği değerlendirilmektedir.

SEM görüntüleri analiz edildiğinde, tüm betonlarda agrega ile hidrate olmuş hamur arasında bir bağ oluştuğu görülmektedir. Kırılma yüzeyinde yapılan ön inceleme sonrasında alınan görüntülerde çimentonun hidrasyonu ile beraber oluşan C-S-H jeli ve ince kristallerden

oluşan etrenjitin olduğu görülmektedir. C-S-H oluşumu ÇKK'dan gelen silis varlığı ile arttığını da söylemek mümkündür.

ÇKK atık bir üründen çıkan yeni bir atık üründür ve mali anlamda değeri de bulunmamaktadır. Bu ürünün çimento yerine kullanılması sonucunda mali kazanımların olacağı da açıktır. Yüksek dozajlı üretimlerde düşük dojlara kıyasla daha fazla ekonomik kazançlar olduğu görülmüştür. ÇKK 200-5 için sağlanan ekonomik kazanç %3,36 iken ÇKK 250-5 için %3,65, ÇKK 300-5 için %3,88 ve ÇKK400-5 için %4,20'dir. Dayanım yerine daha çok yalıtımın önemli olduğu yerlerde kullanılabilecek olan %20 kül katkıli betonların mali katkısının oldukça yüksek olması beklenmekte olup bu katkı ÇKK 200-20 için %13,45, ÇKK 250-20 için %14,61, ÇKK 300-20 için %15,51 ve ÇKK 400-20 için %16,78 seviyesindedir.

Bu çalışmanın, maliyet ve dayanıma olan pozitif etkisiyle beraber atığın geri kazanılması anlamında çevresel bir katkısının da olduğu söylenebilir.

Sonuç olarak, ÇKK betonda puzolan olarak çimento yerine kullanılabilir. Kullanılacak betonlarda dayanım önem arz ediyorsa ona uygun dozaj ve ÇKK ikamesi tercih edilmelidir. Bu oranın en idealinin %5-10 arasında olduğu söylenebilir. Donma çözünmeye maruz kalan bölgelerde dozajı nispeten daha düşük ÇKK ikameli betonların daha yerinde olacağı belirlenmiştir. Dayanımın çok önemli olmadığı tarımsal yapı imalatlarında grobeton, şap betonu, sıva, harç, yer ve duvar kaplamaları gibi uygulamalarda ÇKK katkıli betonlar su/çimento ayarlaması yapılarak kullanıldığında hem atık malzemelerin çevreye olumsuz etkisi giderilecek, hem de düşük maliyetli betonlar üretilebilecektir. Diğer taraftan, yüksek dayanım gerektiren taşıyıcı elamanların imalatında kullanılacak betonlarda ÇKK'nın çok sınırlı olarak kullanılabileceği de söylenebilir. Son olarak, günümüzde birçok çimento üretim tesisinde bazı puzolanlar çimento üretimi esnasında kullanılmaktadır. Bu şekilde sürekli ve sürdürülebilir imalat yapılmasıyla atık üründen sağlanan mali kazanımın daha da artabileceği söylenebilir. Benzer şekilde, çimento üretimi esnasında ÇKK'nın direk kullanılabilirliğinin olması puzolonik çimento üretimi için önemli bir yaklaşım olabilir.

Bundan sonra yapılacak olan ÇKK'nın beton üretiminde kullanılabilirliğinin araştırılacağı çalışmalarda, aşağıdaki hususların göz önüne alınması önerilebilir:

- ÇKK katkısının öneminin araştırılması için özellikle basınç dayanımının hedeflendiği çalışmalarda, spesifik olarak %6, %7, %8, %9 vb. gibi oranlarla çalışılması literatüre daha sonuç odaklı katkılar sağlayabilir.

- KK ikameli beton üretimlerinin farklı dozaj ve kül ikameleriyle korozif ortamlarda reaksiyonlarının araştırılması, betonun önemli gereksinimlerinden olan durabilitenin incelenmesi yönünden yararlı olabilecektir.
- KK ikameli imalatların kuru esnasında su yerine sodyum sülfat, magnezyum sülfat ve farklı agresif çözeltilerde bekletilerek, örneklerin bu çözeltilerin etkilerine karşı davranışının incelenmesi, KK katkısının betondaki etkilerinin anlaşılması yönünden literatüre katkılar sağlayabilecektir.
- KK kullanımı farklı kimyasal akışkanlaştırıcılar ile kullanılmasıyla betonda oluşacak mekanik ve fiziksel özelliklerin iyileştirilmesi sağlanabilecektir.
- Ayrıca KK' nin farklı amaçlara yönelik sıva gibi yapı malzemelerinde puzolan olarak kullanılabilirliğinin incelenmesi yararlı olabilecektir.

KAYNAKLAR

- Adesanya, D. A., Raheem, A. A. (2009). A study of the workability and compressive strength characteristics of corn cob ash blended cement concrete. *Construction and Building materials*, 23(1), 311-317.
- Aghabaglou, A.M., Özen, S., Bayqra, S. H., Ouedraogo, H. A. (2018). Farklı puzolanların tekli, ikili ve üçlü çimentolu sistemleri içeren harç karışımlarının dayanımı ve geçirgenlik performansı açısından kıyaslanması. *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 20(1), 612-625.
- Ahmad, J., Tufail, R. F., Aslam, F., Mosavi, A., Alyousef, R., Faisal Javed, M., Zaid, O., Khan Niazi, M. S. (2021). A Step towards Sustainable Self-Compacting Concrete by Using Partial Substitution of Wheat Straw Ash and Bentonite Clay Instead of Cement. *Sustainability*, 13(2), 824.
- Ahmadi, M. A., Alidoust, O., Sadrinejad, I., Nayeri, M. (2007). Development of mechanical properties of self compacting concrete contain rice husk ash. *International Journal of Computer, Information, and Systems Science, and Engineering*, 1(4), 259-262.
- Akan, İ. E. (2019). *Çanakkale-Ayvacık bölgesinde bulunan volkanik tüfün katkılı çimento üretiminde kullanılabilirliğinin incelenmesi* (Yüksek Lisans Tezi), Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya.
- Akyıldız, A. (2012). *Beton üretiminde bor atıklarının puzolan materyal olarak kullanılabilirliğinin araştırılması* (Doktora Tezi), Namık Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekirdağ.
- Alabandan, B., Olutoye, M., Abolarin, M., Zakariya, M. (2005). Partial replacement of ordinary Portland cement (OPC) with bambara groundnut shell ash (BGSA) in concrete. *Leonardo Electronic Journal of Practices Technologies*, 6, 43-48.
- Alaneme, G. U., Mbadike, E. M. (2021). Experimental investigation of Bambara nut shell ash in the production of concrete and mortar. *Innovative Infrastructure Solutions*, 6(2), 1-13.
- Alkaya, D. (2009). Uçucu Küllerin Zemin İyileştirmesinde Kullanılmasının İncelenmesi. *Electronic Journal of Construction Technologies/Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 5(1).

Anonim, (2005). *Betonsa Taze Beton Sıcaklık Tayini Talimatı*

Anonim, (2017). *Un ve Unlu Mamüller Sektör Raporu, Çerkezköy Ticaret ve Sanayi Odası.*

26 Aralık 2021, Erişim Adresi

https://cerkezkoytso.org.tr/uploads/docs/cerkezkoy_tso_un_ve_unlu_mamuller_sektor_raporu.pdf

Anonim, (2021-a). İnşaat Birim Fiyatlarına Esas İşçilik –Araç ve Gereç Rayiç Listeleri. T.C.

Çevre ve Şehircilik Bakanlığı Yüksek Fen Kurulu Başkanlığı. Erişim tarihi: 19.07.2021

<https://webdosya.csb.gov.tr/db/yfk/icerikler/insaat-birim-fiyatlari-2021-turkce>

Anonim, (2021-b). *2020 Yılı Hububat Sektör Raporu, Toprak Mahsülleri Ofisi Genel*

Müdürlüğü. 12 Ağustos 2021, Erişim adresi

<https://www.tmo.gov.tr/Upload/Document/sektorraporlari/hububat2020.pdf>

Aruntag, H. Y., Beycioğlu, A. (2014). Puzolanik zeolit (klinoptilolit) katkılı çimentoların fiziksel ve mekanik özelliklerinin araştırılması. *El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi*, 1(2), 57-67.

ASTM C1113-99 (2004)., Standarts Test Method for Thermal Conductivity Refractories by Hot Wire (Platinum Resistance Thermometer Thecnique).

Ataie, F. F., Riding, K. A. (2013). Thermochemical pretreatments for agricultural residue ash production for concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 25(11), 1703-1711.

Aydın, S., Karatay, Ç., Baradan, B. (2010). The effect of grinding process on mechanical properties and alkali–silica reaction resistance of fly ash incorporated cement mortars. *Powder technology*, 197(1-2), 68-72.

Aziz, M. A. E., Aleem, S. A. E., Heikal, M., Didamony, H. E. (2004). Effect of polycarboxylate on rice husk ash pozzolanic cement. *Sil. Ind*, 69, 9-10.

Bakır, H. (2011). *Dolgu Maddesi Oranının Kendiliğinden Yerleşen Beton Özelliklerine Etkisi.* (Yüksek Lisans Tezi), Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yapı Eğitimi Anabilim Dalı, Ankara.

Bheel, N., Ibrahim, M. H. W., Adesina, A., Kennedy, C., Shar, I. A. (2021). Mechanical performance of concrete incorporating wheat straw ash as partial replacement of cement. *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, 6(1), 1-7.

- Bonavetti, V., Donza, H., Menendez, G., Cabrera, O., Irassar, E. F. (2003). Limestone filler cement in low w/c concrete: A rational use of energy. *Cement and Concrete Research*, 33(6), 865-871.
- Boukendakdji, O., Kadri, E.-H., Kenai, S. (2012). Effects of granulated blast furnace slag and superplasticizer type on the fresh properties and compressive strength of self-compacting concrete. *Cement concrete composites*, 34(4), 583-590.
- Buari, T., Ademola, S., Ayegbokiki, S. (2013). Characteristics Strength of groundnut shell ash (GSA) and Ordinary Portland cement (OPC) blended Concrete in Nigeria. *IOSR Journal of Engineering*, 3(7), 1-7.
- Cassar, L., Pepe, C., Tognon, G., Guerrini, G. L., Amadelli, R. (2003, May). White cement for architectural concrete, possessing photocatalytic properties. In *Proceedings of the 11th International Congress on the Chemistry of Cement* (Vol. 4, pp. 2012-2021).
- Ceylan, H., Davraz, M. (2013). Andezit kesim artiklarının puzolanik özelliklerinin araştırılması *Bilimsel Madencilik Dergisi*, 52(3).
- Ceylan, H. (2020). Isparta tüfünün puzolanik özelliklerinin araştırılması. *Teknik Bilimler Dergisi*, 10(2), 1-6.
- Chandra, S., Eklund, L., Villarreal, R. R. (1998). Use of cactus in mortars and concrete. *Cement and concrete research*, 28(1), 41-51.
- Chindapasirt, P., Homwuttiwong, S., Sirivivatnanon, V. (2004). Influence of fly ash fineness on strength, drying shrinkage and sulfate resistance of blended cement mortar. *Cement and Concrete Research*, 34(7), 1087-1092.
- Cho, B. S., Lee, H. H., Choi, Y. C. J. C. (2017). Effects of aluminate rich slag on compressive strength, drying shrinkage and microstructure of blast furnace slag cement. *Construction Building Materials*, 140, 293-300.
- Cong, P., Chen, S., Chen, H. (2012). Effects of diatomite on the properties of asphalt binder. *Construction and Building Materials*, 30, 495-499. *Building Materials*, 30, 495-499.
- Çelik, Ç., Gürdal, E. (2010). Yerfıstığı kabuğunun agrega olarak kullanım olanakları. *İTÜDERGİSİ/a*, 4(1).

- Çelik, H., Emeksiz, F. (2019). Türkiye'de pirinç üretimi, tüketimi ve pazarlaması. *Çukurova Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 37(1).
- Çetin, M., Baki, V. A., Gürbüz, A. (2018). Silis dumanı katkılı harçlar üzerine deneysel bir çalışma. *Türk Hidrolik Dergisi*, 2(2), 9-12.
- Çolakoğlu, B. (2018). *Tarımsal atıkların alternatif kullanım alanları konusunda üretici eğilimleri*. (Yüksek Lisans Tezi), Namık Kemal Üniversitesi, Tekirdağ
- Daştan, A. (2005). *Pişmiş Killerin Puzzolanik Özellikleri* (Doktora Tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Demirel, B., Nasıroğlu, S. (2017). Bor Mineralleri ve Atıklarının Çimentoda Kullanılma Stratejileri. *Fırat University Journal of engineering Science*, 29(1), 95-100.
- Demirkollu, M., (2021) *Beton Çeşitleri Nelerdir?* 01 Aralık 2021, Erişim adresi <https://www.sanalsantiye.com/beton-cesitleri-ve-temel-ozellikleri/>
- Demiröz, A. (2009). Uçucu küllerin geoteknik mühendisliğinde kullanımı. *Selçuk-Teknik Dergisi*, 8(3), 212-221.
- Değirmenci, N., Yılmaz, A. (2009). Use of diatomite as partial replacement for Portland cement in cement mortars. *Construction and Building Materials*, 23(1), 284-288.
- De Sensale, G. R. (2006). Strength development of concrete with rice-husk ash. *Cement and concrete composites*, 28(2), 158-160.
- Ekmekyapar, T., Örüng, İ., (1993). İnşaat Malzeme Bilgisi, Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayınları No:151, Erzurum.No:145, Erzurum.
- Erdoğan, T. Y. (1997). *Admixtures for concrete*. Ankara: Middle East Technical University Press.
- Erdoğan, T.Y. (2003). Beton, ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim AŞ Yayını, 1: Baskı.
- Erdoğan, S. T., Erdoğan, T. Y. (2005). Puzolanların Bağlayıcılık Potansiyelinin Romalılar Tarafından Keşfi ve Romalılardan Önce Puzolan Kullanımı. *Hazır Beton, Temmuz-Ağustos 2005*, 50-52.
- Erdoğan T. Y. (2007). *Beton*. Ankara : O.D.T.Ü. Yayıncılık.

- Erdoğan, S.T., Erdoğan, T.Y., (2007). Puzolanik Mineral Katkılar ve Tarihi Geçmişleri. II. Yapılarda Kimyasal Katkılar Sempozyumu, 263-275, Ankara.
- Erdoğan, S.T., Erdoğan, T.Y. (2010). Portland çimentosunun Joseph Aspdin tarafından icadı ve çimento üretiminde Aspdin ailesinin rolü.
- Engin, Y. (2015). *Türkiye'de üretilen (ve üretilmeyen) çimento tipleri*. 20 Ocak 2021, Erişim adresi <https://www.betonvecimento.com/cimento/cimento-tipleri>
- Erdoğdu, K., Tokyay, M., Türker, P. (1999). Traslar ve traslı çimentolar. *Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, AR-GE*, Y99-2, Ekim, 32.ss.
- Erdoğdu, Ş., Kurbetçi, Ş. (2003). Betonun performansına sağladıkları etkinlik açısından kimyasal ve mineral katkı maddeleri. *Türkiye Mühendislik Haberleri*, 426(4), 115-120.
- Erzengin, S. G. (2019). Polikarboksilat-bazlı süperakışkanlaştırıcıların silis dumanı içeren çimento hamurlarının reolojik davranışına etkileri. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 25(6), 627-634.
- Felekoglu, B. (2007). Utilisation of high volumes of limestone quarry wastes in concrete industry (self-compacting concrete case). *Resources, Conservation and Recycling*, 51(4), 770-791.
- Ferreira, E. G. A., Yokaichiya, F., Rodrigues, M. S., Beraldo, A. L., Isaac, A., Kardjilov, N., Franco, M. K. (2017). Assessment of Greener Cement by employing thermally treated sugarcane straw ashes. *Construction and Building Materials*, 141, 343-352.
- Fragoulis, D., Stamatakis, M. G., Papageorgiou, D., Chaniotakis, E. (2005). The physical and mechanical properties of composite cements manufactured with calcareous and clayey Greek diatomite mixtures. *Cement and Concrete Composites*, 27(2), 205-209.
- Fu, X., Wang, Y., Huang, S., Hou, X., Hou, W. (2003). The influences of siliceous waste on blended cement properties. *Cement and Concrete Research*, 33(6), 851-856.
- Gradinaru, C. M., Serbanoiu, A. A., Muntean, R. (2020). The mechanical properties and the freeze-thaw resistance of an ecological micro concrete made with sunflower stalks. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 789, No. 1, p. 012021). IOP Publishing.

- 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.
- Gündüz, L., Kalkan, Ş. O. (2017). Pirinç kabuğu külünün çimentolu hafif kompozit harçlarda dayanım artırıcı katkı olarak kullanılması üzerine teknik bir inceleme.
- Habeeb, G. A., Mahmud, H. B. (2010). Study on properties of rice husk ash and its use as cement replacement material. *Materials research*, 13(2), 185-190.
- Hamalı, Y. (2007). *Metakaolin ve silis dumanı içeren harç ve betonların özellikleri* (Doktora Tezi), İstanbul Teknik üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Helepciuc, C. M., Barbuta, M., Serbanoiu, A. A. (2018). Characterization of a lightweight concrete with sunflower aggregates. *Procedia Manufacturing*, 22, 154-159.
- Hu, L., He, Z., Zhang, S. (2020). Sustainable use of rice husk ash in cement-based materials: Environmental evaluation and performance improvement. *Journal of Cleaner Production*, 264, 121744.
- Ikumapayi, C. M., Arum, C., & Alaneme, K. K. (2021). Reactivity and hydration behavior in groundnut shell ash based pozzolanic concrete. *Materials Today: Proceedings*, 38, 508-513.
- Jain, N. (2012). Effect of nonpozzolanic and pozzolanic mineral admixtures on the hydration behavior of ordinary Portland cement. *Construction and Building Materials*, 27(1), 39-44.
- Jamil, M., Khan, 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.
- Kalınçimen, G., Öztürk, A., Kaplan, G. ve Yıldız, S. (2015). Seramik atıklarının çimento ikame malzemesi olarak kullanılması ve asit dayanıklılığının incelenmesi. *Kastamonu University Journal of Engineering and Sciences*, 1(1), 9-16.
- Kaya, E. S. (2019). *Ham perlit ve geliştirilmiş perlitin puzolanik malzeme olarak kullanılabilirliği* (Yüksek Lisans Tezi), Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir.

- Kazmi, S. M. S., Munir, M. J., Patnaikuni, I., Wu, Y.-F. J. C. (2017). Pozzolanic reaction of sugarcane bagasse ash and its role in controlling alkali silica reaction. *Construction Building Materials*, 148, 231-240.
- Khan, R., Jabbar, A., Ahmad, I., Khan, W., Khan, A. N., Mirza, J. (2012). Reduction in environmental problems using rice-husk ash in concrete. *Construction and Building Materials*, 30, 360-365.
- Kıvrak, S. O. (2012). *Çeltik sapı ve kavuzu külünün puzolanik özellikleri ve beton özelliklerine etkisinin araştırılması* (Doktora Tezi), Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Kıvrak, S. O., Başyığıt, C. (2012). Çeltik sapı külü elde edilmesinde puzolaniklik açısından uygun yakma sıcaklığı araştırılması. *Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi*, 4(3), 94-101.
- Kishore, R., Bhikshma, V., Prakash, P. J. (2011). Study on strength characteristics of high strength rice husk ash concrete. *Procedia Engineering*, 14, 2666-2672.
- Koçak, Y. (2010). Trasin çimento yüzey özelliğine, hidrasyona ve basınç dayanımına etkisi. *Technological Applied Sciences*, 5(1), 1-14.
- Köseoğlu, K., Üzüm, O., Çakır, Ö. (2015). Beton yapı bileşenlerinin ısı yalıtım özellikleri yönünden incelenmesi: bir derleme. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 3(3), 545-553.
- Kucche, K. J., Jamkar, S. S., Sadgir, P. A. (2015). Quality of water for making concrete: a review of literature. *International Journal of Scientific and Research Publications*, 5(1), 1-10.
- Kurugöl, S. (2015). Farklı Sıcaklıklarda Kalsine Edilen Killerin Mekanik Özellikleri ve Ultrases Hızlarının Erken Yaşlarda İncelenmesi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 15(2), 1-11.
- Kurugöl, S., Güleç, A. (2017). Puzolanik Aktivite Kimyasal Tespit Yöntemleri. *Restorasyon ve Konservasyon Çalışmaları Dergisi*(19), 63-72.
- Kuşkonmaz, N. (1993). *Pirinç kabuğundan silisyum nitrür tozunun sentezi* (Doktora Tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul

- Li, S., Roy, D. M. (1986). Investigation of relations between porosity, pore structure, and C1–diffusion of fly ash and blended cement pastes. *Cement and Concrete Research*, 16(5), 749-759.
- Malinowski, R. (1979). Concretes and mortars in ancient aque-ducts. *Concrete International*, 1(1), 66-76.
- Mannan, M. A., Ganapathy, C. (2004). Concrete from an agricultural waste-oil palm shell (OPS). *Building and environment*, 39(4), 441-448.
- Mazlum, F. (1989). *Pirinç kabuğu külünün puzolanil özellikleri ve külün çimento harcının dayanıklılığına etkisi* (Doktora Tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Mehta, P. K., Monteiro, P. J. M., (2006) “Concrete, Microstructure, Properties an Materials”, McGraw-Hiil Companies, Inc., Third Edition, New York, 486.
- Mehta, A., Ashish, D. K. (2020). Silica fume and waste glass in cement concrete production: A review. *Journal of Building Engineering*, 29, 100888.
- Memon, S. A., Javed, U., Khushnood, R. A. (2019). Eco-friendly utilization of corncob ash as partial replacement of sand in concrete. *Construction and Building Materials*, 195, 165-177.
- Mircea, D. M. (2019). Self-Cleaning Concrete for Landscaping Applications. In *MATEC Web of Conferences* (Vol. 289, p. 05004). EDP Sciences.
- Moraes, J., Tashima, M., Akasaki, J. L., Melges, J., Monzó, J., Borrachero, M., Soriano, L., Payá, J. (2017). Effect of sugar cane straw ash (SCSA) as solid precursor and the alkaline activator composition on alkali-activated binders based on blast furnace slag (BFS). *Construction and Building Materials*, 144, 214-224.
- Mouli, M., Khelafi, H. (2008). Performance characteristics of lightweight aggregate concrete containing natural pozzolan. *Building and environment*, 43(1), 31-36.
- Oancea, I., Bujoreanu, C., Budescu, M., Benchea, M., Grădinaru, C. M. (2018). Considerations on sound absorption coefficient of sustainable concrete with different waste replacements. *Journal of Cleaner Production*, 203, 301-312.

- Ogork, E.-N. N., Uche, O. A. (2014). Effect of Particle Size of Groundnut Husk Ash (GHA) in Cement Paste and Mortar. *International Journal on Recent Innovation Trends in Computing Communication*, 2(9), 2764-2769.
- Omrane, M., Rabehi, M. (2020). Effect of natural pozzolan and recycled concrete aggregates on thermal and physico-mechanical characteristics of self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 247, 118576.
- Örtlek, E. (2015). *Mısır, buğday ve ayçiçeği sapı külü ile barit ve kolemanit katkılı betonların mühendislik özellikleri*. (Yüksek Lisans Tezi), Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kahramanmaraş.
- Öz, H. Ö. (2017). Atık Cam Tozu ve Yüksek Fırın Cürufunun İçeren Kendiliğinden Yerleşen Harçların Taze, Mekanik ve Durabilite Özellikleri. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 20(4), 9-22.
- Özcan, U., Güngör, S. (2019). Sürdürülebilir Bir Yöntem/Betonda Puzolan Kullanımı. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (15), 176-182.
- Özocak, M. (2021). *Fındık kabuğu külünün puzolan malzeme olarak kullanılması ile üretilen betonun tarımsal yapılarda kullanılabilirliğinin araştırılması* (Doktora Tezi), Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekirdağ.
- Pandey, S. P., Singh, A. K., Sharma, R. L., Tiwari, A. K. (2003). Studies on high-performance blended/multiblended cements and their durability characteristics. *Cement and Concrete Research*, 33(9), 1433-1436.
- Pelletier, L., Winnefeld, F., Lothenbach, B. (2010). The ternary system Portland cement–calcium sulphoaluminate clinker–anhydrite: hydration mechanism and mortar properties. 32(7), 497-507.
- Pera, J., Husson, S., Guilhot, B. (1999). Influence of finely ground limestone on cement hydration. *Cement and Concrete Composites*, 21(2), 99-105.
- Perraki, T., Kontori, E., Tsivilis, S., Kakali, G. (2010). The effect of zeolite on the properties and hydration of blended cements. *Cement and Concrete Composites*, 32(2), 128-133.
- Pinto, J., Vieira, B., Pereira, H., Jacinto, C., Vilela, P., Paiva, A., Pareira, S., Cunha, V.T.V.F., Varum, H. (2012). Corn cob lightweight concrete for non-structural applications. *Construction and Building Materials*, 34, 346-351.

- Posi, P., Lertnimoolchai, S., Sata, V., Chindaprasirt, P. (2013). Pressed lightweight concrete containing calcined diatomite aggregate. *Construction and Building Materials*, 47, 896-901.
- 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.
- Rattanachu, P., Toolkasikorn, P., Tangchirapat, W., Chindaprasirt, P., Jaturapitakkul, C. (2020). Performance of recycled aggregate concrete with rice husk ash as cement binder. *Cement and Concrete Composites*, 108, 103533.
- Sada, B. H., Amartey, Y. D., Bakoc, S. (2013). An Investigation into the use of groundnut as fine aggregate replacement. *Nigerian Journal of Technology*, 32(1), 54-60.
- Saraswathy, V., Song, H. W. (2007). Corrosion performance of rice husk ash blended concrete. *Construction and building materials*, 21(8), 1779-1784.
- Sarıkaya, H. (2006). *Zeolit katkılı betonların fiziksel ve mekanik özelliklerinin araştırılması* (Yüksek Lisans Tezi), Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Scrivener, K. L., Cabiron, J.-L., Letourneux, R. (1999). High-performance concretes from calcium aluminate cements. *Cement and concrete research*, 29(8), 1215-1223.
- Sersale, R., Prigione, G. (1987). Portland-zeolite-cement for minimizing alkali-aggregate expansion. *Cement and Concrete Research*, 17(3), 404-410.
- Shanmugavel, D., Selvaraj, T., Ramadoss, R., Raneri, S. (2020). Interaction of a viscous biopolymer from cactus extract with cement paste to produce sustainable concrete. *Construction and Building Materials*, 257, 119585.
- Souza, A. T., Barbosa, T. F., Riccio, L. A., Santos, W. J. (2020). Effect of limestone powder substitution on mechanical properties and durability of slender precast components of structural mortar. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(1), 847-856.
- Srinivasan, R., Sathiyaraj, K. (2010). Experimental study on bagasse ash in concrete. *International Journal for Service Learning in Engineering, Humanitarian Engineering Social Entrepreneurship*, 5(2), 60-66.

- Sua-Iam, G., Makul, N. (2017). Effect of incinerated sugarcane filter cake on the properties of self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 130, 32-40.
- Şahmaran, M., Christianto, H. A., Yaman, İ. Ö. (2006). The effect of chemical admixtures and mineral additives on the properties of self-compacting mortars. *Cement and concrete composites*, 28(5), 432-440.
- Şimşek, B., Şimşek, E. H., Altunok, T. (2013). Bir Çimento Döner Fırın Sistemi Yüzeyinden Isı Kayıplarının Ampirik ve İstatistiki Modellenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 28(1).
- Şişman, C. B., Kocaman, İ., Gezer, E. (2008). Doğal Zeolitten Üretilen Hafif Betonun Tarımsal Yapılarda Kullanılabilirliği Üzerine Bir Araştırma. *Tekirdağ Ziraat Fakültesi Dergisi*, 5(2), 187-195.
- Şişman, C. B., Gezer, E., Kocaman, I. (2011). Effects of organic waste (rice husk) on the concrete properties for farm buildings. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 17(1), 40-48.
- Şişman, C. B., Alkaya, S. (2019). Usability of sunflower stems as lightweight aggregate in concrete production. *Fresenius Environmental Bulletin*, 28(12 A), 9983-9990.
- Tangchirapat, W., Saeting, T., Jaturapitakkul, C., Kiattikomol, K., Siripanichgorn, A. (2007). Use of waste ash from palm oil industry in concrete. *Waste management*, 27(1), 81-88.
- Taş, M., Fidan, D., Yılmaz, F. (2018). Uçucu kül ve Bayburt Taşı ile zemin stabilizasyonu. *Bayburt Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 1(1), 8-14.
- Teo, D. C. L., Mannan, M. A., Kurian, V. J. (2006). Structural concrete using oil palm shell (OPS) as lightweight aggregate. *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, 30(4), 251-257.
- Tian, M., Han, L., Meng, Q. (2020). Experimental study on the mechanical performance of grouted specimen with composite ultrafine cement grouts. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 24(1), 38-48.
- Tokyay, M., Erdoğan, K. (2003). Cürufklar ve Cürufllu Çimentolar. Araştırmaların Gözden Geçirilmesi ve Durum Değerlendirmesi Raporu. *TÇMB, Ankara*, 47s.
- Topçu, İ.B. (2006). *Beton* (Yayın No:2). TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası.

- Topçu, İ. B., Sofuoğlu, T. (2020). Pres Filtre Atığı ve Uçucu Kül ile Elde Edilen Geopolimer Harçların Farklı Koşullar Altında Birim Ağırlığı ve Basınç Dayanımının Değerlendirilmesi. *El-Cezeri Journal of Science and Engineering*, 7(2), 806-823.
- Turanlı, L., Yücel, H., Güncüoğlu, C. M., Çulfaz, A., Uzal, B. (2007). Doğal zeolitlerin inşaat endüstrisinde kullanımı.
- Türk Standartları Enstitüsü (1999). TS ISO 9964-3 Su kalitesi- Sodyum ve potasyum tayini bölüm 3: Sodyum ve potasyumun alev emisyon spektrometrisi ile tayini, Ankara.
- Türk Standartları Enstitüsü (2002). TS EN 206-1, Beton- Bölüm 1: Özellik, Performans, İmalat Ve Uygunluk, Ankara.
- Türk Standartları Enstitüsü (2003). TS EN 1008, Beton- karma suyu- numune alma, deneyler ve beton endüstrisindeki işlemlerden geri kazanılan su dahil, suyun beton karma suyu olarak uygunluğunun tayini kuralları. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Türk Standartları Enstitüsü (2008). Doğal Puzolan (Tras) – Çimento ve Betonda Kullanılan-Tarifler, gerekler ve uygunluk kriterleri. TS-25, Ankara.
- Türk Standartları Enstitüsü (2008). Uçucu Kül- Betonda kullanılan- Bölüm: 2 Uygunluk değerlendirmesi. TS-EN 450-2, Ankara.
- Türk Standartları Enstitüsü (2009). Beton agregaları, TS 706 EN 12620+A1, Ankara.
- Türk Standartları Enstitüsü (2010). Beton, Sertleşmiş Beton Deneyleri- Bölüm: 6 Deney numunelerinin yarmada çekme dayanımının tayini, TS-EN 12390-6., Ankara.
- Türk Standartları Enstitüsü (2011). Betonun donma çözülme direncinin tayini- yapısal iç hasar, TSE CEN/TR 15177. Türk Standartlar Enstitüsü, Ankara.
- Türk Standartları Enstitüsü (2012). Çimento- Bölüm:1 Genel Çimentolar- Bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri, TS-EN 197-1, Ankara.
- Türk Standartları Enstitüsü (2012). Agregaların Geometrik Özellikleri İçin Deneyler- Bölüm 1: Tane Büyüklüğü Dağılımının Tayini- Eleme Yöntemi. TS-EN 933-1, Ankara.
- Türk Standartları Enstitüsü (2013). Beton Karma Suyu Numune Alma, Deneyler ve Beton Endüstrisindeki İşlemlerden Geri Kazanılan Su Dahil, Suyun Beton Karma Suyu Olarak Uygunluğunun Tayini Kuralları. TS-EN 1008, Ankara.
- Türk Standartları Enstitüsü (2013). Çimento deney yöntemleri- Bölüm: Çimentonun kimyasal analizi. TS-EN 196-2, Ankara.

- Türk Standartları Enstitüsü (2013). Uçucu Kül- Betonda kullanılan- Bölüm: 1 Tarif, özellikler ve uygunluk kriterleri. TS-EN 450-1, Ankara.
- Türk Standartları Enstitüsü (2019). Beton- Taze beton deneyleri- Bölüm-2: Çökme (slump) deneyi. TS EN 12350-2, Ankara.
- Türk Standartları Enstitüsü, (2019). Beton, Sertleşmiş Beton Deneyleri- Bölüm:2 Dayanım Deneylerinde kullanılacak deney numunelerinin hazırlanması ve küre tabi tutulması, TS EN 12390-2, Ankara.
- Türk Standartları Enstitüsü (2019). Beton, Sertleşmiş Beton Deneyleri-Bölüm 7: Sertleşmiş betonun yoğunluk tayini. TS-EN 12390-7, Ankara.
- Türk Standartları Enstitüsü, (2019). Beton, Sertleşmiş Beton Deneyleri- Bölüm: 3 Deney numunelerinin basınç dayanımının tayini, TS-EN 12390-3, Ankara.
- United States Environmental Agency, (1986). Test Method 9038: Sulfate (Turbidimetric), EPA 9038.
- Ukrainczyk, N., Matusinovic, T. (2010). Thermal properties of hydrating calcium aluminate cement pastes. *Cement and Concrete Research*, 40(1), 128-136.
- Uluöz, N., Özbebek, H., Arslan, M., Açık, H. (2013). Farklı çimento tipleri ve mineral katkıları ile üretilen betonların mekanik ve geçirimsizlik özellikleri
- Uygunoğlu, T. (2009). Yüksek oranda silis dumanı içeren harçlarda alkali-silika reaksiyonu (ASR) gelişiminin incelenmesi. *Electronic Journal of Construction Technologies/Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 5(2).
- Uysal, M., Mercan, N., Sümer, M. (2011). Farklı Dozlarda Üretilen Beyaz Betonların Basınç Dayanımına Farklı Kür Şartlarının Etkisi. *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 15(2), 139-145.
- Ünal, O., Uygunoğlu, T., Yıldız, A. (2007). Investigation of properties of low-strength lightweight concrete for thermal insulation. *Building and Environment*, 42(2), 584-590.
- Vaickelionis, G., Valanciene, V. (2016). Lightweight concrete with an agricultural waste– buckwheat husk. *Materials Science*, 22(1), 98-104.
- Van Tuan, N., Ye, G., Van Breugel, K., Fraaij, A. L., Dai Bui, D. (2011). The study of using rice husk ash to produce ultra high performance concrete. *Construction and Building Materials*, 25(4), 2030-2035.

- Van, V.-T.-A., R bller, C., Bui, D.-D., Ludwig, H.-M. J. C. (2014). Rice husk ash as both pozzolanic admixture and internal curing agent in ultra-high performance concrete. *Cement and Concrete Composites*, 53, 270-278.
- Yashwanth, M., Nagarjuna, P. (2016). An experimental study on synergic effect of sugar cane baggage ash and fly ash in concrete.
- Yazıcı, H. (2007). The effect of curing conditions on compressive strength of ultra high strength concrete with high volume mineral admixtures. *Building and environment*, 42(5), 2083-2089.
- Yıldız, S., Balaydın, İ., Ulucan, Z. . (2007). Prinç kabuğu külünün beton dayanımına etkisi. *Fırat Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 19(1), 85-91.
- Yılmaz, T., Erıkdı, B., Cihangir, F (2017). Yüksek Fırın Cürufu ve Perlit İkamesinin imentolu Macun Dolgunun Mekanik ve Mikroyapı  zelliklerine Etkisi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 32(2), 239-252.
- Zhang, B., Tan, H., Shen, W., Xu, G., Ma, B., Ji, X. (2018). Nano-silica and silica fume modified cement mortar used as Surface Protection Material to enhance the impermeability. *Cement and Concrete Composites*, 92, 7-17.
- Zhou, Y., Peng, Z. C., Chen, L. C., Huang, J. L., Ma, T. (2021). The influence of two types of alkali activators on the microstructure and performance of supersulfated cement concrete: mitigating the strength and carbonation resistance. *Cement and Concrete Composites*, 118, 103947.
- Qudoos, A., Kim, H. G., Ryou, J.-S. (2018). Effect of mechanical processing on the pozzolanic efficiency and the microstructure development of wheat straw ash blended cement composites. *Construction and Building Materials*, 193, 481-490.
- Wang, A., Zhang, C., Sun, W. (2003). Fly ash effects: I. The morphological effect of fly ash. *Cement and Concrete Research*, 33(12), 2023-2029.
- Worrell, E., Martin, N., Price, L. (2000). Potentials for energy efficiency improvement in the US cement industry. *Energy*, 25(12), 1189-1214.
- Xu, S., Wang, J., Ma, Q., Zhao, X., Zhang, T. (2014). Study on the lightweight hydraulic mortars designed by the use of diatomite as partial replacement of natural hydraulic lime and masonry waste as aggregate. *Construction and Building Materials*, 73, 33-40.