

Kükürtlü Betonun Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi ve  
Kullanım Alanlarının Arttırılması

Muhammed Emre Danış

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Ocak 2022

Investigation of Physical and Mechanical Properties of Sulfur Concrete and  
Increasing Usage Areas

Muhammed Emre Daniş

**MASTER OF SCIENCE THESIS**

Department of Civil Engineering

January 2022

Kükürtlü Betonun Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi ve  
Kullanım Alanlarının Arttırılması

Muhammed Emre Danış

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı  
Yapı Bilim Dalında  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
Olarak Hazırlanmıştır

Danışman: Prof. Dr. İlker Bekir Topçu

Ocak 2022

## ETİK BEYAN

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre, Prof. Dr. İlker Bekir Topçu danışmanlığında hazırlamış olduğum “Kükürtlü Betonun Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi ve Kullanım Alanlarının Arttırılması” başlıklı Yüksek Lisans tezimin özgün bir çalışma olduğunu; tez çalışmamın tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; tezimde verdiğim bilgileri, verileri akademik ve bilimsel etik ilke ve kurallara uygun olarak elde ettiğimi; tez çalışmamda yararlandığım eserlerin tümüne atıf yaptığımı ve kaynak gösterdiğimi ve bilgi, belge ve sonuçları bilimsel etik ilke ve kurallara göre sunduğumu beyan ederim.

14/03/2022

Muhammed Emre DANIŞ  
İmza

## ÖZET

Bu çalışmada petrol rafinerilerinden yan ürün olarak elde edilen saf kükürt ile agrega ve çeşitli katkıları karıştırılarak oluşturulan kükürtlü betonun (KB) fiziksel ve mekanik özelliklerine etkileri ve normal Portland Çimentolu Beton (PÇB) ile karşılaştırılması yapılmıştır. Deneysel çalışmada farklı deney numune boyutları ve karışım oranları kullanılmıştır. Bu çalışmadaki kükürtlü karışımlarda hiç su kullanılmayarak, susuz beton üretimi yapılmıştır. Kükürtlü harç karışımları ısıtılarak ergitilmiş ve kalıplara boşaltılmıştır. Farklı oranlarda kaba ve ince agregalar ile 6 farklı seri oluşturularak optimum agrega tayini yapılmış ve optimum karışım oranı belirlenmiştir. Optimum agrega karışımı belirlendikten sonra 4 farklı beton serisi ile geleneksel ve kükürtlü beton arasındaki özellikler belirlenmiştir.

Ayrıca disiklopentadien (DCPD) kimyasal katkı malzemesi kullanılarak optimum agrega oranının ile DCPD katkı maddesinin etkisi gözlemlenmiştir. Donatısız olarak üretilen geleneksel Portland çimentolu numunelerde ise 28. ve 90. gün dayanımları belirlenmiş ve karşılaştırmalar yapılmıştır. Portland çimentolu numuneler 0,5 su/çimento oranına sahiptir ve üretilen bütün numuneler optimum agrega oranının ile bulunan sabit bir agrega oranı ile üretilmiştir. Kükürtlü betonun ve Portland çimentosu betonunun bütün numunelerinde aynı agrega granülometrisi kullanılmıştır. Her bir seri için 3 farklı numune dökülen bu tez çalışmasında; basınç testi, çekme testi, eğilme testi, su emme kapasitesi testi, ultra ses geçiş hızı testi, birim ağırlık, elektriksel özdirenç testi ve optimum agrega deneyi belirlenmiştir.

Bu tez çalışmasının sonunda, kükürtlü beton (susuz beton) yüksek basınç ve eğilme dayanımı, su kullanılmadan beton dökümüne imkân tanınması ve yüksek elastisite modülü ile geleneksel Portland çimentolu betonlardan daha iyi sonuçlar vermiştir. Kükürt ve katkı içeren numuneler geleneksel Portland çimento betonuna göre daha iyi basınç dayanımı, elektriksel direnç ve kılcallık katsayısı değerleri vermiştir. Tartışma bölümünde daha önceki çalışmalar ile bu tez çalışması arasındaki farklar değerlendirilmiştir. Matematiksel modeller ve eğilim çizgileri yardımıyla deney sonuçları arasındaki ilişkiler yorumlanmıştır. Sonuçlar bölümünde çalışmadan alınan çıktılarına, önerilere yer verilmiş ve değerlendirme yapılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Kükürt, Susuz beton, Dayanım, Eğilme, Dayanıklılık.

## SUMMARY

In this study, the effects of pure sulfur obtained as a by-product from petroleum refineries on the physical and mechanical properties of sulphureous concrete (KB), which is formed by mixing aggregate and various additives, and comparison with normal Portland Cement Concrete (PCB). Different test sample sizes and mixing ratios were used in the experimental study. Anhydrous concrete was produced without using any water in the sulfur mixtures in this study. By forming 6 different series with coarse and fine aggregates in different ratios, optimum aggregate determination was made and optimum mixing ratio was determined. After the optimum aggregate mixture was determined, the properties between 4 different concrete series and conventional and sulfur concrete were determined.

In addition, the effect of optimum aggregate ratio and DCPD additive was observed by using dicyclopentadiene (DCPD) chemical additive. On the other hand, 28th and 90th day strengths were determined and comparisons were made for conventional Portland cement samples produced without reinforcement. Portland cement samples have a water/cement ratio of 0.5 and all samples produced were produced with a constant aggregate ratio found with the optimum aggregate ratio. In this thesis study, 3 different samples were poured for each series; pressure test, tensile test, bending test, water absorption capacity test, ultra sound transmission velocity test, unit weight, electrical resistivity test and optimum aggregate test were determined.

At the end of this thesis, sulphureous concrete (anhydrous concrete) gave better results than conventional Portland cement concrete with its high compressive and flexural strength, allowing concrete pouring without the use of water, and a high modulus of elasticity. Samples containing sulfur and additives gave better compressive strength, electrical resistance and capillarity coefficient values compared to conventional Portland cement concrete. In the discussion section, the differences between previous studies and this thesis study are evaluated. The relationships between the experimental results were interpreted with the help of mathematical models and trend lines.

**Keywords:** Sulfur, Waterless concrete, Strength, Bending, Durability.

## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

|                                                                              |             |
|------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| <b>ÖZET .....</b>                                                            | <b>vi</b>   |
| <b>SUMMARY .....</b>                                                         | <b>vii</b>  |
| <b>TEŞEKKÜR.....</b>                                                         | <b>viii</b> |
| <b>İÇİNDEKİLER.....</b>                                                      | <b>ix</b>   |
| <b>ŞEKİLLER DİZİNİ.....</b>                                                  | <b>xi</b>   |
| <b>ÇİZELGELER DİZİNİ.....</b>                                                | <b>xiii</b> |
| <b>SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....</b>                                   | <b>xiv</b>  |
| <b>1. GİRİŞ VE AMAÇ .....</b>                                                | <b>1</b>    |
| <b>2. KÜKÜRDÜN KULLANIM ALANLARI VE LİTERATÜR ARAŞTIRMASI .....</b>          | <b>6</b>    |
| 2.1. Kükürdün Yapısı .....                                                   | 6           |
| 2.2. Kükürtlü (Susuz) Betonların Gelişimi .....                              | 10          |
| 2.3. Kükürtlü Betonların Kullanımları ile İlgili Literatür Araştırması ..... | 14          |
| <b>3. MATERYAL VE YÖNTEM .....</b>                                           | <b>24</b>   |
| 3.1. Kullanılan Malzemeler .....                                             | 24          |
| 3.1.1. Çimento .....                                                         | 24          |
| 3.1.2. Agregalar .....                                                       | 25          |
| 3.1.3. Su.....                                                               | 25          |
| 3.1.4. Disiklopentadien.....                                                 | 26          |
| 3.1.5. Kükürt.....                                                           | 27          |
| 3.2. Kullanılan Aletler .....                                                | 28          |
| 3.2.1. Kapalı kükürt eritme ve döküm alanı .....                             | 28          |
| 3.2.2. Mekanik karıştırıcı .....                                             | 29          |

|           |                                                                |           |
|-----------|----------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.2.3.    | Termometre.....                                                | 29        |
| 3.2.4.    | Kalıplar .....                                                 | 30        |
| 3.2.5.    | Beton mikseri .....                                            | 30        |
| 3.3.      | Beton Karışım Oranları.....                                    | 31        |
| 3.4.      | Numune Üretimi ve Kür Koşulları .....                          | 32        |
| 3.5.      | Yapılan Deneyler .....                                         | 34        |
| 3.5.1     | Birim Ağırlık ve Ultrases Geçiş Hızı.....                      | 34        |
| 3.5.2     | Agregaların Birim Hacim Ağırlıklarının Bulunması .....         | 35        |
| 3.5.3     | Basınç ve Eğilme Dayanımları .....                             | 37        |
| 3.5.4     | Elektriksel Özdirenç Deneyleri.....                            | 37        |
| 3.5.5     | Kılcal Su Emme Deneyi .....                                    | 39        |
| <b>4.</b> | <b>DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRİLMESİ .....</b>              | <b>40</b> |
| 4.1.      | Optimum Agrega Tayini .....                                    | 40        |
| 4.2.      | Birim Ağırlık Deney Sonuçları .....                            | 41        |
| 4.3.      | Ultrases Geçiş Hızı Deney Sonuçları.....                       | 42        |
| 4.4.      | Basınç Dayanımı Deney Sonuçları .....                          | 43        |
| 4.5.      | Eğilme Dayanımı Deney Sonuçları .....                          | 45        |
| 4.6.      | Elektriksel Direnç Deneyi Sonuçları .....                      | 46        |
| 4.7.      | Kılcallık Katsayısı.....                                       | 47        |
| <b>5.</b> | <b>BULGULAR VE TARTIŞMA .....</b>                              | <b>48</b> |
| 5.1.      | Kükürtlü Betonlar ile İlgili Maliyet Araştırması .....         | 49        |
| 5.2.      | Kükürtlü Betonların Avantaj ve Dezavantajları .....            | 52        |
| 5.3.      | Regresyon Analizleri ile Sonuçların Tartışılması .....         | 53        |
| 5.4.      | Sonuçların Yapılan Diğer Çalışmalar ile Karşılaştırılması..... | 55        |
| <b>6.</b> | <b>SONUÇ VE ÖNERİLER .....</b>                                 | <b>60</b> |
|           | <b>KAYNAKLAR DİZİNİ.....</b>                                   | <b>65</b> |

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sekil

### Sayfa

|                                                                                                                                                                         |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1.1. Petrol rafinerilerinde yan ürün olarak çıkan rafine kükürt .....                                                                                                   | 2  |
| 2.1. Kükürdün taş ve toz formları .....                                                                                                                                 | 6  |
| 2.2. Dünyada kükürt üretimi ve ihracatı yapan önemli ülkeler .....                                                                                                      | 8  |
| 2.3. Yıllara göre ülkelerdeki kükürt miktarının artışı .....                                                                                                            | 9  |
| 2.4. Kükürdün istiflenmesi ve taşınması .....                                                                                                                           | 9  |
| 2.5. Kükürtlü beton ve Portland çimentosu betonunun karışım oranları .....                                                                                              | 12 |
| 2.6. Portland betonu ve kükürtlü betonun iç yapısı. ....                                                                                                                | 14 |
| 2.7. Robotik aletler yardımı ile Ayda beton dökümü tasarımı .....                                                                                                       | 15 |
| 2.8. Ayda susuz beton kullanılarak oluşturulan tasarım .....                                                                                                            | 16 |
| 2.9. Ay zemininin katmanları .....                                                                                                                                      | 17 |
| 2.10. Kükürtlü betonlu kirişteki yatay soğuk derz. ....                                                                                                                 | 18 |
| 2.11. Kükürtlü beton ile üretilmiş numuneler.....                                                                                                                       | 19 |
| 3.1. Enjektör yardımıyla disiklopentadien alınması .....                                                                                                                | 27 |
| 3.2. Deneyisel çalışmalarda kullanılan saf kükürt .....                                                                                                                 | 27 |
| 3.3. Deneyisel çalışmalarda kullanılan havalandırmalı kapalı alan.....                                                                                                  | 28 |
| 3.4. Çimentolu karışımları hazırlamakta kullanılan mekanik karıştırıcı .....                                                                                            | 29 |
| 3.5. Deneyisel çalışmalarda kullanılan kalıplar .....                                                                                                                   | 30 |
| 3.6. Çalışmalarda kullanılan beton mikseri .....                                                                                                                        | 31 |
| 3.7. Kükürtlü beton numunelerinin üretim aşaması a) kükürdün erime aşaması<br>b) erimiş kükürtün karıştırılması ve homojenleştirilmesi.....                             | 32 |
| 3.8. Kükürtlü betonların soğutulması ve kalıptan çıkartılması a) prizmatik numunenin<br>soğuma aşaması b)küp numunenin soğuma aşaması c) kalıptan çıkarılan numune..... | 33 |
| 3.9. Numunelerin suda ve laboratuvar ortamında kür edilmesi.....                                                                                                        | 34 |
| 3.10. Birim ağırlık ve ultrases geçiş hızı ölçümlerinin yapılması .....                                                                                                 | 35 |
| 3.11. Birim hacim ağırlık deneyinin yapılması .....                                                                                                                     | 36 |
| 3.12. Beton numunelerde basınç ve eğilme dayanım değerinin ölçümü .....                                                                                                 | 37 |
| 3.13. Numuneler üzerinde elektriksel öz direnç deneyinin uygulanması.....                                                                                               | 38 |

|                                                                           |    |
|---------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.14. Kılcal su emme deney düzeneği .....                                 | 39 |
| 4.1. Beton serilerine göre birim ağırlık değerlerinin değişimi .....      | 41 |
| 4.2. Beton serilerine göre ultrases geçiş hızlarının değişimi .....       | 42 |
| 4.3. Agregalı ve agregasız susuz betonların kırılma şekilleri.....        | 43 |
| 4.4. Beton serilerine göre basınç dayanımlarının değişimi .....           | 44 |
| 4.5. Beton serilerine göre eğilme dayanımlarının değişimi.....            | 45 |
| 4.6. Beton serilerine göre elektriksel direnç değerlerinin değişimi ..... | 46 |
| 4.7. Beton serilerine göre su emme değerlerinin değişimi .....            | 47 |
| 5.1. Basınç dayanımı ile kılcallık katsayısı arasındaki ilişki.....       | 54 |
| 5.2. Basınç dayanımı sonuçlarının karşılaştırılması .....                 | 56 |
| 5.3. Eğilme dayanımı sonuçlarının karşılaştırılması .....                 | 58 |

## ÇİZELGELER DİZİNİ

### Cizelge

### Sayfa

|                                                                                                 |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.1. H <sub>2</sub> S ve SO <sub>2</sub> gazlarının insan ve canlılar üzerindeki etkileri ..... | 7  |
| 2.2. Kullanılan kükürt oranına göre dayanımların değişimi.....                                  | 20 |
| 2.3. Farklı beton çeşitlerinin dayanım değerleri .....                                          | 21 |
| 2.4. Kükürtlü harç ve betonların dayanım özellikleri.....                                       | 22 |
| 3.1. Çimentonun kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri.....                                  | 24 |
| 3.2. Agreganın elek analizi ve fiziksel özellikleri .....                                       | 25 |
| 3.3. Şebeke suyunun kimyasal analizi .....                                                      | 26 |
| 3.4. Disiklopentadien özellikleri.....                                                          | 26 |
| 3.5. Kükürdün fiziksel ve kimyasal özellikleri.....                                             | 28 |
| 3.6. Beton karışım oranları .....                                                               | 31 |
| 3.7. Elektriksel direnç ile korozyon arasındaki ilişki .....                                    | 38 |
| 4.1. Optimum agrega tayini ile çeşitli oranların deneysel sonuçları .....                       | 40 |
| 5.1. Kükürtlü ve çimentolu betonların maliyetlerinin karşılaştırılması.....                     | 50 |
| 5.2. Susuz beton ve geleneksel betonların maliyet araştırması .....                             | 50 |
| 5.3. Bu tez çalışmasında yapılan geleneksel betonların maliyet araştırması.....                 | 51 |
| 5.4. Bu tez çalışmasında yapılan susuz betonların maliyet araştırması.....                      | 51 |

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

| <b><u>Simgeler</u></b>  | <b><u>Açıklama</u></b>                                         |
|-------------------------|----------------------------------------------------------------|
| DCPD                    | Disiklopentadien                                               |
| KB                      | Kükürtlü beton                                                 |
| PÇB                     | Portland çimentolu beton                                       |
| D                       | Taze betonun yoğunluğu, $\text{kg/dm}^3$                       |
| F                       | Numunenin kırılma anındaki yük, kgf.                           |
| h                       | Numune yüksekliği, cm.                                         |
| l                       | Mesnetler arası mesafe, cm.                                    |
| $m_1$                   | Kabın boş kütlesi, kg                                          |
| $m_2$                   | Kabın, içerisindeki numune ile birlikte toplam kütlesi, kg     |
| b                       | Numune genişliği, cm.                                          |
| M                       | En yüksek moment                                               |
| $M_0$                   | 90 gün süreyle küre tabi tutulduktan sonraki numune kütlesi, g |
| $M_j$                   | 28 gün süreyle suya temas sonrası ölçülen numune kütlesi, g    |
| N                       | Sodyum hidroksit (NaOH)                                        |
| $\text{H}_2\text{SO}_4$ | Sülfürik Asit                                                  |
| $\text{SO}_2$           | Kükürt Dioksit                                                 |
| $\text{H}_2\text{S}$    | Hidrojen Sülfür                                                |
| MgO                     | Magnezyum Oksit                                                |
| V                       | Kabın Hacmi, $\text{dm}^3$                                     |
| G                       | Ölçüm Boyu (mm)                                                |
| $\sigma_f$              | Eğilme dayanımı, kgf/cm                                        |
| SEM                     | Scanning electron microscope (Taramalı Elektron Mikroskobu)    |
| TS EN                   | Türk Standartları European Norm                                |

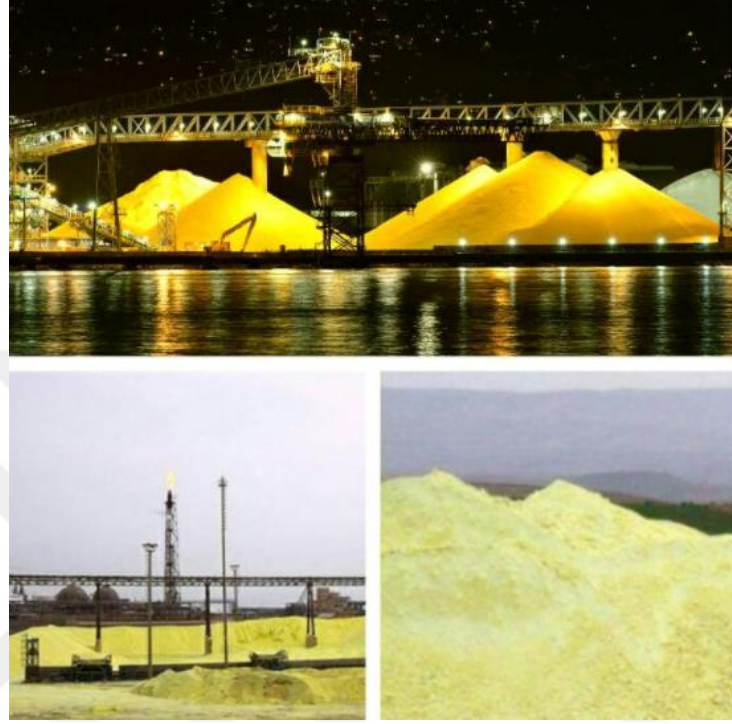
## 1. GİRİŞ VE AMAÇ

Medeniyetlerin kurulmasında, yaşamsal faaliyetlerin başında ilk önce sığınma, konaklama ihtiyacı düşünülmüş ve bunun üzerinde araştırmalar ve yenilikler yapılmıştır. İnsanlığın başlamasında mağaraların yontulmasıyla başlayan sığınma ihtiyacı, alet kullanımının artmasıyla zaman içerisinde önemli dönemler geçirmiştir. 1852 yılında ilk betonarmeden bina yapılması ile çağ atlamış olan yapı sektörü 21. Yüzyılda uzay çağına uyum sağlamak üzere adımlar atmaya başlamıştır. Gelişen teknolojik yenilikler hayatımızı kolaylaştırmaktan öte farklı bir boyut kazandırmıştır. Artık gelişmenin önünde hiçbir limitinin olmaması insanoğlu tarafından fark edilmeye başlanmıştır (Topçu ve Şengel, 2004; Topçu ve Uzunömeroğlu, 2019). Elde edilen başarı beraberinde farklı amaçlara hizmet etmek üzere akıllı betonlar adlı yeni nesil beton türlerinin kullanımını da yaygınlaştırmıştır.

Bu amaç doğrultusunda beton karışım hesabı ve üretiminde yapılan dış müdahalelerle akıllı beton üretimine başlanmıştır. Akıllı beton üretimi ile ilgili yapılan bu yeni çalışmalar, betonun yapı sektöründe vazgeçilmez bir malzeme olarak kullanılması özelliğini daha da sağlamlaştırmıştır (Topçu ve Karakurt, 2008; Topçu ve Canbaz, 2007).

Yeni nesil beton üretiminin en önemli özellikleri sürdürülebilir olması ve üretimi sağlanacak betonun daha kolay ve ucuz temin edilmesidir (Topçu ve Boğa, 2011; Topçu ve Uğurlu, 2002). Bu kapsamda beton üretiminin temel bileşenlerinden olan suyun, bulunamaması veya kısıtlı bir seviyede olması mümkün olabilir (Topçu ve Canbaz, 2004). Susuz beton, içinde su bulunmayan ana bileşenleri modifiye edilmiş kükürtlü çimento ve agregadan oluşan özel bir beton türüdür. Kükürt normal kristal formu ve soluk-sarı bir elementtir. Bulunduğumuz yüzyılın başından beri kükürdün farklı agregalarla birlikte uygun bir bağlayıcı olabileceği düşünülmektedir. Kullanım alanları boru hatlarından endüstriyel tanklara, yüzey kaplamalarından kaldırımlara ve derz dolgusu bileşenlerine kadar uzanmaktadır (Toutanji vd., 2012; Kucharczykova vd., 2019). Kükürtlü beton çalışmalarıyla ilgili alınan ilk patentlerde yaygın kullanımı yüzey kaplamaları, asit etkisine dayanıklı boru hatları gibi alanlar için uygun görülmüştür. Zamanla gelişen yorumlama yeteneğimiz sayesinde geçmişte sadece kısıtlı alanlarda kullanılan kükürdün daha uygun alanlarda ve daha çok verim elde ederek kullanılabileceği görülmüştür. Fosil yakıt tüketimi

tüm dünyada hızla artmakta ve petrol rafine işlemlerinin bir yan ürünü olarak elde edilen kükürt miktarı artmaktadır (Wagenfeld vd.,2019;Vlahovic vd.,2012; Abdel-Jawad vd.,1994).



Şekil 1.1. Petrol rafinerilerinde yan ürün olarak çıkan rafine kükürt

Rafineri kükürt, doğal gazın işlenmesi ve rafine yağların bir ürünüdür. Kükürt üç ana yoldan elde edilir: mineral kükürt, saflıklardan geri kazanım, ham petrol ve doğal gazdan elde edilen rafineri kükürt. Dünyanın birçok yerinde rafinerilerden elde edilen rafineri kükürt, rafinaj işlemleri sonrasında depolanma bölgeleri baz alındığında tüm zamanların en yüksek seviyesine ulaşmıştır (Shin vd., 2014; Morin vd., 2011).

Su içermediği halde kükürdün bağlayıcılık özelliği kazanabilmesi, kükürtlü betonu dünya dışında kurulacak olan yerleşimlerin kurulumunda kullanılabilecek en uygun malzeme olarak ön plana çıkarmaktadır. Uzay araştırmaları tarihi boyunca ay, gezegenimize olan yakınlığından dolayı en çok ilgi uyandıran gök cismi olmuştur. Minimal atmosferi, uzun geceleri ve hassas hareketleri Ay derin uzay astronomisi için ideal bir uydudur. Gelecekte ay, uzay gemilerinin yakıt ikmali yapacağı ve diğer gezegenlere doğru yola çıkacağı bir üs olacaktır. Ayda kullanılacak yapı malzemeleri yüksek dayanım, süneklik, dayanıklılık, sertlik, yüksek yırtılma ve delinme direnci, düşük ısıl genleşmesi gibi özelliklere sahip

olmalıdır (Cai vd., 2019). Ay'da yapılar inşa etmek için; güç, üretim ve tedarik maliyeti göz önünde bulundurularak uygun malzemeleri seçmek gerektiği belirtilmiştir (Hou vd., 2019). Susuz beton üretimi, bünyesinde önemli miktarda kükürt bulunduran Ay yüzeyinde, suya gereksinim duyulmaksızın beton dökümüne olanak sağlayabilir (Koh vd., 2010). Ay'da beton dökümü ile ilgili daha öncede birçok araştırma yapılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucu, yukarıda bahsedilenlere benzer birçok örnekte, yapı sektöründe kükürt kullanımının artarak devam ettiği görülmektedir.

Ülkemizde ve dünyada tarım başta olmak üzere birçok alanda kullanılan ve petrol rafinerisi yan ürünü olarak giderek artan kükürt miktarının değerlendirilmesinde araştırmacıların inşaat sektörü üzerinde durması yeni bir yapı malzemesi olarak kükürt bağlayıcılı betonların ortaya çıkmasına neden olmuştur. Kükürt betonlarda (KB) kullanılan kükürt, geleneksel Portland çimento betonlarında (PÇB) bağlayıcı olarak kullanılan çimento ve suyun görevini üstlenerek, daha az türde ve maliyette yapı malzemesi ile daha yüksek dayanımlar elde etmeyi amaçlar (Afzal ve Khan, 2018; Akkurt vd., 2009). Kükürt katı bir element olmasına rağmen ısıtıldığı takdirde, eriyerek sıvılaşma özelliği göstermektedir. Belirli ısıtım işlem yöntemleri ile eritilen kükürt, agrega ve filler ile birleştirilerek (su kullanılmadan) soğumaya bırakılır ve bu soğuma işleminin sonunda elde edilen madde sertleşmiş beton özellikleri göstermektedir (Abd El Haleem vd., 2010; Albayrak, 2016).

Son yıllarda dünya kükürt rezervlerindeki artış nedeniyle kükürdün yapı malzemesi olarak kullanılmasının amaçlandığı araştırmaların sayısında da artış meydana gelmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar ve saha uygulamaları, kükürt bağlayıcılı betonların Portland çimentosu kullanılarak hazırlanan betonlara göre kimyasal ve mekanik olarak daha üstün özelliklere sahip olduğunu göstermektedir (Ciak ve Harasymiuk, 2013; Dehestani, vd., 2017). Bu özellikler sayesinde aynı dayanıma sahip fakat su gerektirmeyen beton üretimi gerçekleştirilebilmektedir (Faramarzi vd., 2017; Gursel vd., 2014). Bunun yanı sıra kükürtlü beton yüksek korozyon ve asit direnci göstererek, geleneksel betonların kullanılma imkanının olmadığı bölgelerde başarıyla uygulanmaktadır (Topçu ve Danış, 2022).

Ham petrol ve doğal gazdan kükürdün ayrıştırılması, çeşitli çevre koruma kanunları aracılığıyla zorunlu ve denetimli hale getirilmiştir. Bundan dolayı ham petrol ve doğal gaz tüketimindeki artış ile kükürt, dünya çapında uluslararası ticareti yapılan en önemli

ürünlerden birisi haline gelmiştir (Lee vd., 2014; Maraghechi vd., 2011). Petrol endüstrisinden elde edilen kükürtteki artışın nedeni; sadece petrol kullanımındaki artış olarak değil aynı zamanda getirilen ve zorunlu tutulan çevresel zararların azaltılması kapsamında, yeni çevre kanun ve yaptırımları olarak gösterilebilir. IMO (Uluslararası Denizcilik Örgütü) tarafından getirilen ve 2020 yılında devreye girmiş olan yeni düzenleme ile denizcilik yakıtlarında üst sınırı %3,5 olan kükürt oranı %0,5 oranı ile sınırlandırıldı. Bu düzenlemenin mevcut kükürt üretiminde senelik toplam üretimin %6'sı kadar artışa neden olmuştur (Souaya vd., 2015; Toklu vd., 2017; Mohamed vd., 2015; Moon vd., 2016; Khademi, 2015).

Alternatif birçok sektörde kullanım alanı olması nedeniyle kükürdün kullanım alanlarını ana bir başlık altında toplamak oldukça zordur. Ancak gerçekleşen toplam üretim miktarı içinde ticaretin en yoğun gerçekleştiği; yani kükürdün aktif tüketim alanlarının olduğu sektörler gübre, kimya, cevher madenciliği, petrol, ilaç, atık yönetimi, kâğıt hamuru ve kâğıt endüstrisi olarak gösterilebilir. Gübre endüstrisi toplam kükürt üretiminin %60'ının kullanıldığı başlıca tüketim kaynağıdır. Saf kükürt aynı zamanda kimya sektöründe sülfürik asit ( $H_2SO_4$ ) elde etmek amacıyla kullanılmakla birlikte kâğıt hamuru ve kâğıt endüstrisi, petrol işleme ve sentetik kauçuk üretiminde de saf halde kullanılmaktadır (Karakoç vd., 2011; Hu vd., 2019).  $H_2SO_4$  ise birçok sektörde katalizör ve kaplama proseslerinin kimyasal reaksiyonları için genel bir kullanım alanına sahiptir. Mevcut saf kükürt ve sülfürik asit kullanımı nispeten yoğunlaşmakta ancak, artan küresel üretimin tüketilmesi için yalnızca sınırlı kullanım alanları bulunmaktadır (Çerçevik vd., 2018; Birkham vd., 2010; Çavdar ve Yetkin, 2010).

Beton içerisinde kükürt kullanımının, bu tez çalışmasının ilerleyen bölümlerinde de belirtileceği üzere birçok açıdan avantajı vardır. Bunlardan en önemlisi kükürdün ekonomikliğidir. Çimento kullanımı doğaya verdiği zararın yanı sıra yüksek maliyet oluşturur. Ayrıca çimento için bahsedilebilecek çok sayıda zararlı etkilerden biriside, çimentonun doğadaki sera gazı emisyonlarının büyük bir kısmından sorumlu olduğudur. Dünyadaki toplam karbondioksit ( $CO_2$ ) emisyonunun %5'inden fazlası çimento üretim sürecinde meydana gelmektedir. Ham petrol işlenmesi sırasında açığa çıkan kükürdün çimento yerine kullanımı çimento üretim miktarlarının azalmasına ve dolayısı ile çevresel zararların düşmesine destek olacağı tahmin edilmektedir (Contreras, 2013).

Alternatif birçok sektörde kullanım alanı olması nedeniyle kükürdün kullanım alanlarını ana bir başlık altında toplamak oldukça zordur. Ancak gerçekleşen toplam üretim miktarı içinde ticaretin en yoğun gerçekleştiği; yani kükürdün aktif tüketim alanlarının olduğu sektörler gübre, kimya, cevher madenciliği, petrol, ilaç, atık yönetimi, kâğıt hamuru ve kâğıt endüstrisi olarak gösterilebilir. Gübre endüstrisi toplam kükürt üretiminin %60'ının kullanıldığı başlıca tüketim kaynağıdır. Saf kükürt aynı zamanda kimya sektöründe sülfürik asit ( $H_2SO_4$ ) elde etmek amacıyla kullanılmakla birlikte kâğıt hamuru ve kâğıt endüstrisi, petrol işleme ve sentetik kauçuk üretiminde de saf halde kullanılmaktadır.  $H_2SO_4$  ise birçok sektörde katalizör ve kaplama proseslerinin kimyasal reaksiyonları için genel bir kullanım alanına sahiptir. Artan küresel üretimin azalması için yalnız sınırlı kullanım alanları bulunmaktadır.

Bu yüksek lisans çalışması kapsamında, farklı oranlarda kullanılan kükürt, agrega ve katkıların, birbirleri ile olan etkileri ve bu etkilerin sertleşmiş beton özelliklerine ve zararlı etkilere karşı performansları araştırılmıştır. Çalışmada karışım oranlarına bağlı olarak farklı seriler üretilmiştir. Kükürt kısa sürede priz alarak dayanım kazanan bir elementtir. Buna bağlı olarak hem kükürtlü hem çimentolu karışımlarda 2 farklı kür süresi uygulanmış, 28. ve 90. günlerde söz konusu deneyler gerçekleştirilmiştir. Tez kapsamında donatısı olmayan küp ve dikdörtgen prizma şekilli numuneler üzerinde basınç testi, çekme testi, eğilme testi, su emme testi, ultra ses geçiş hızı testi ve yüksek sıcaklık etkisi gibi mekanik testler yapılmıştır.

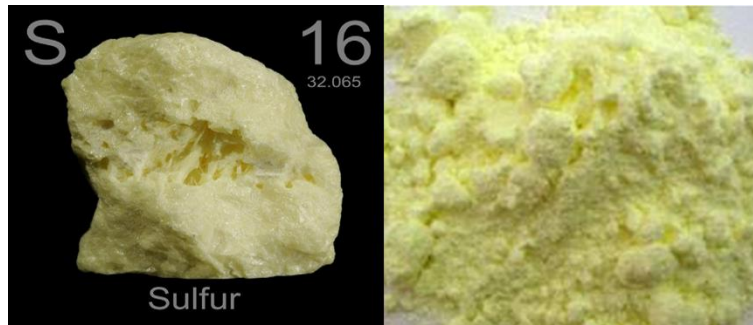
Giriş ve amaç bölümünde tez çalışmasının kapsamı ve çalışmayı yürütme amacı belirtilmiştir. İkinci bölümde kükürdün tanımı, üretimi, kullanım alanları ve tarihsel gelişimi hakkında genel bilgilerden bahsedilmiştir. Bu bölümde ayrıca daha önce yapı alanında kullanılan kükürt ile ilgili literatür araştırması ve bu araştırmaların sonuçlarına yer verilmiştir. Aynı zamanda kükürtlü beton kullanılarak gerçekleştirilen saha uygulama örnekleri ve kükürdün çevresel etki değerlendirmesi de bu bölüm kapsamında açıklanmaktadır. Deneysel çalışmalara üçüncü bölümde değinilmiştir ve bu kapsamda beton tasarımında kullanılmış malzemelerin genel özellikleri, numune serilerinin karışım oranları, üretilen beton tipleri, kür koşulları ve süreleri ayrıca uygulanan deneyler hakkında bilgiler bilgi verilmiştir. Fiziksel, mekanik ve dayanıklılık ile ilgili deney sonuçları ve bu sonuçların değerlendirilmesi ile ilgili bilgilere dördüncü bölümde yer verilmiştir. Bu tez çalışmasının sonuçları ise beşinci bölümde açıklanmıştır.

## 2. KÜKÜRDÜN KULLANIM ALANLARI VE LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Bu bölümde, kükürdün yapısı, üretim aşamaları ve dayanım mekanizması hakkında genel bilgiler verilmiştir. Ayrıca kükürdün Türkiye ve dünyada kullanımı, gelecekteki olası kullanım alanları, maliyet araştırmaları ve geçmişte yapılan çalışmalara yer verilmiştir. Bölüm sonunda bu çalışmanın özgünlüğü hakkında bilgi verilmiş ve literatüre katkısı açıklanmıştır.

### 2.1. Kükürdün Yapısı

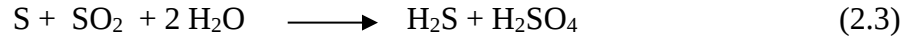
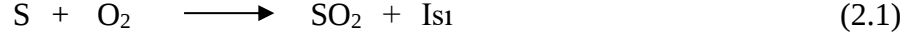
1777 yılında bir element olarak keşfedilen kükürt, periyodik tabloda “S” simgesi ile 6A grubunun 16 atom numaralı bir ametaldir. Kükürt; katı, sıvı ve toz çeşitleri vardır. Tane ölçüleri ve saflık derecelerine göre seçeneklere ayrılır. Çeşitleri, fiziksel olarak farklılık gösterse de kimyasal özellik olarak aynıdır. Sarı renkli, yanıcı ve patlayıcı bir elementtir. Dünyada bulunan elementlerin %0,06’sını kükürt oluşturur. Bitki ve hayvanların vücutlarında da belirli miktarda kükürt elementi bulunur. Doğada veya yapay yollarda kükürt elde edebilmek için hidrojen-sülfür ( $H_2S$ ) ve sülfürdioksit ( $S_2O$ ) gazlarının oksitlenip çökmesi gerekir (Dugarte, 2018).



Şekil 2.1. Kükürdün taş ve toz formları (Dugarte, 2018)

Kükürt tatsız ve kokusuz bir elementtir. Yandığı zaman ortaya çıkan gazlar, boğucu ve zehirli gazlar sınıfına giren kükürtdioksit ( $SO_2$ ) ve hidrojen-sülfür ( $H_2S$ ) dür. Bu nedenle kükürdün yakılması sırasında mutlaka gerekli güvenlik önlemleri alınmalı ve maskeler kullanılmalıdır. Aşağıda kükürdün ısıtılması ile oluşan bazı asit ve gazların formülleri verilmiştir. Kükürdün, ısı iletkenliği azdır ve elektrik iletkenliği yoktur, bu nedenle iyi bir

yalıtkandır. Ülkemizde ve dünyada yaygın olarak kullanılan kükürt çeşitleri ise şu şekildedir; maden kükürdü, tarım kükürdü, sanayi kükürdü, ilaç kükürdü ve doğal kükürt.



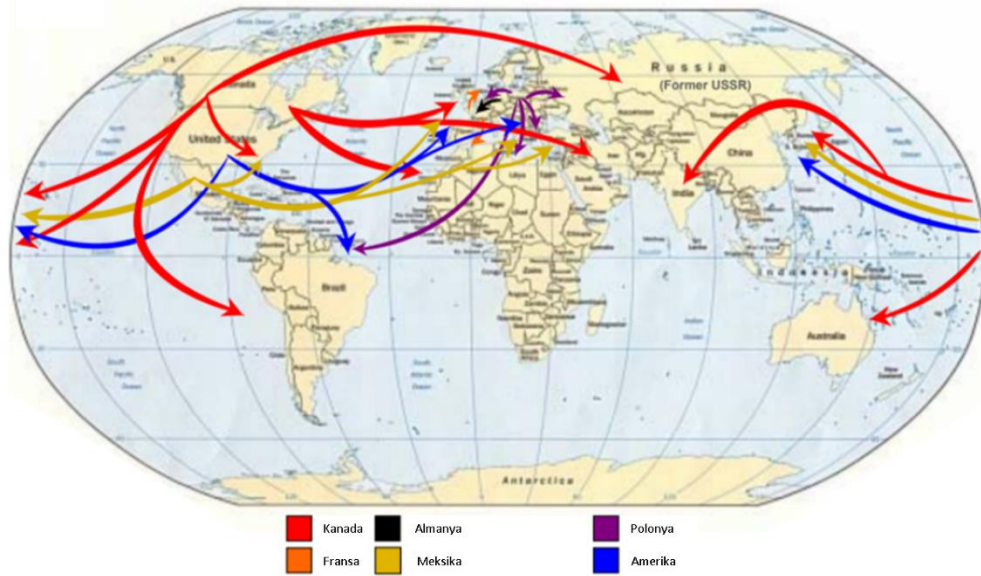
Kükürdün yapı malzemesi olarak kullanılması konusundaki en büyük endişe, kükürdün işlenmesi sırasında açığa çıkan  $H_2S$  ve  $SO_2$  gibi zehirli gazlardır.  $H_2S$  yaklaşık 0,02 ppm gibi düşük konsantrasyon seviyelerinde dahi fark edilebilen bozuk yumurta kokusuna sahip olması ile bilinmektedir. Bununla birlikte, koku iyi bir gösterge değildir, çünkü  $H_2S$  koku duyusunun alınmasını zamanla yok eder; bu nedenle daha yüksek konsantrasyonların fark edilmesi zorlaşmaktadır. Teksas Ulaştırma Enstitüsünde gerçekleştirilen çalışmalarda farklı  $H_2S$  seviyelerinin insan üzerinde farklı bölgelerde zehirli etkisinin olduğu belirlenmiştir (Khoshnevis, 2004).

Çizelge 2.1.  $H_2S$  ve  $SO_2$  gazlarının insan ve canlılar üzerindeki etkileri

| <b><math>H_2S</math> (ppm)</b> | <b>Etki</b>                                                   |
|--------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| 0,02                           | Koku eşiği                                                    |
| 0,10                           | Göz tahrişi                                                   |
| 5-10                           | İzin verilen maksimum seviye                                  |
| 70-150                         | Uzun süreli temas sonrası hafif belirtilerin başladığı seviye |
| 170-300                        | Ciddi sonuçlar olmadan bir saat boyunca solunabilen seviye    |
| 400-700                        | 30-60 dk içinde tehlikeli seviye                              |
| 600                            | 30 dk içinde öldürücü seviye                                  |
| <b><math>SO_2</math> (ppm)</b> | <b>Etki</b>                                                   |
| 0,3-1                          | Tat ile tespit edilebilir                                     |
| 3                              | Fark edilebilir koku                                          |
| 5                              | İzin verilen maksimum seviye                                  |
| 6-12                           | Burun ve boğazda hızlı tahriş                                 |
| 20                             | Gözlerde tahriş                                               |
| 50-100                         | 30-60 dk içinde tehlikeli seviye                              |
| 400-500                        | Yaşamsal tehlike                                              |

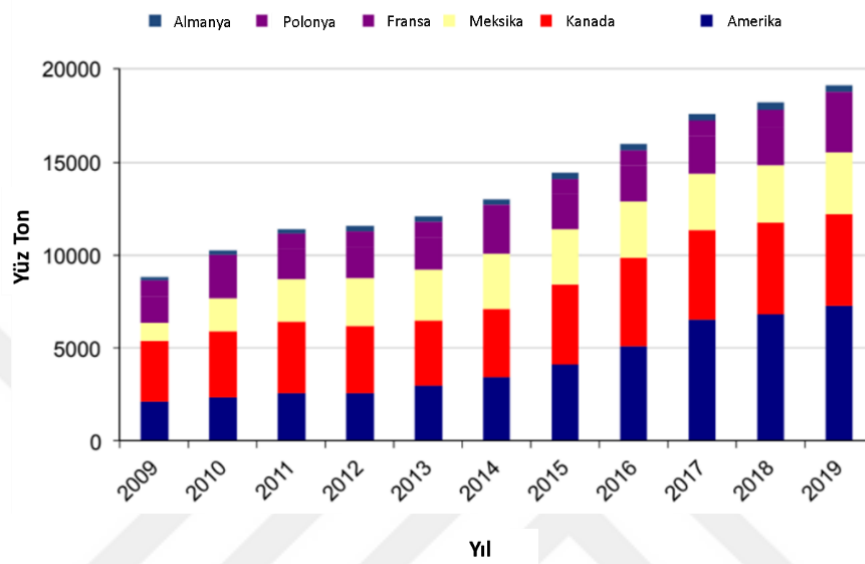
Çizelge 2.1 göz önünde bulundurularak, yapımdan sorumlu olan veya tesiste çalışan personel tarafından kullanılan alanlarda  $H_2S$  emisyonlarına sürekli maruz kalma durumu için üst limit 5 ppm'lik konsantrasyon değeri olarak gösterilmektedir. 600 ppm ve üzerinde ise 30 dk. içerisinde ölümcül etkiler görülebilmektedir (Khoshnevis vd., 2016).  $SO_2$  renksizdir ve  $H_2S$  gibi varlığından haberdar olunabilecek bir kokuya sahiptir. Kükürt reaksiyonları sonucu oluşan zararlı gazların insan ve canlı sağlığı üzerine etkilerinin, gaz konsantrasyonuna göre değişimi aşağıdaki tablolarda verilmiştir. Kükürt, madeni olarak ve tedarik endişeleri bakımından diğer elementlerden farklılık gösterir. Dünya üzerinde, kükürt madenlerinden kükürt üretimi ekonomik ve sektörel kullanım açısından üretimi daha azdır.

Kükürt, maden olarak çıkmasının yanı sıra petrol ve doğalgaz rafinerilerinde yan ürün olarak üretilir. Dünyanın birçok yerinde rafinerilerden yan ürün halinde atılan kükürt 'rafineri kükürt' olarak adlandırılır ve yapay kükürt sınıfına girer. Rafineri kükürdün depolanması ve bertaraf edilmesi yüksek maliyet oluşturmakta ve bu kükürt stokları birçok yerde gittikçe artmaktadır (Mohamed ve Gamal, 2007). Araştırmacılar bu kükürdün değerlendirmesi için çalışmalarına devam etmektedir. Maden işletmesine göre yan ürün elde etme yöntemi daha kolay ve ucuz bir yoldur. Global olarak petrol; başta ulaşımın hemen hemen her dalında olmak üzere petrokimya, sanayi, plastik, zirai gübreler, pestisitler, solventler gibi birçok alanda temel hammadde olarak kullanılmaktadır.



Şekil 2.2. Dünyada kükürt üretimi ve ihracatı yapan önemli ülkeler (Narmin vd., 2008)

Meksika, Almanya, Kanada, Polonya, Amerika Birleşik Devletleri, Fransa Norveç ve İspanya gibi ülkelerde çok sayıda kükürt kaynağı bulunur (Narmin vd., 2008). Yaklaşık 50 ülkede de petrolden yan ürün olarak üretilmektedir. Dünyada en çok kükürt ihracat eden ülkelerin ve transfer edilen bölgelerin yerleri Şekil 2.2’de verilmiştir.



Şekil 2.3. Yıllara göre ülkelerdeki kükürt miktarının artışı (Vlahovic vd., 2011)

Dünyanın önde gelen ülkelerinde petrol rafinerilerinden son yıllarda ortaya çıkan kükürt fazlalığının yıllara göre değişimi Şekil 2.3’de verilmiştir (Vlahovic vd., 2011). Şekilden görüleceği üzere bu miktar tehlikeli şekilde yıldan yıla artmaktadır ve bertaraf işlemleri maliyet oluşturmaktadır. Kükürdün yapı sektörüne kazandırılması bu stokları azaltarak çevre kirliliğinin ve bertaraf maliyetlerini düşürecektir.



Şekil 2.4. Kükürdün istiflenmesi ve taşınması (Khoshnevis, 2004)

Kükürt diğer elementlerden farklıdır. Endüstriyel elementlerin karşılaştığı sorunlar gerek duyulan malzemelerin üretilme yolları, sürdürülebilirliğin sağlanması, alternatif kaynakların araştırılması gibi endişeler olurken kükürtte ise olay bunun tam tersidir. Alternatif yollardan endüstriyel olarak stoklanan kükürdün üretim miktarı, tüketim miktarından fazladır. Bu nedenle çevreye zarar vermeden stoklanan kükürdün kullanılma yollarının araştırılması bilim insanlarına sorumluluklar yüklemiştir. Doğal kükürtler doğada element halinde bulunduğu gibi, birçok elementle birleşerek sülfürler, sülfatlar ve organik bileşikler halinde, tortul, metamorfik ve volkanik kayalarda ve bütün fosil yakıtlarında bulunmaktadır. Volkanik kökenli 12 ülkede zengin kükürt oluşumları mevcuttur. Türkiye’de Balıkesir, Muğla Milas, Isparta, Denizli ve Van’da doğal kükürt yatakları bulunmaktadır.

Petrolden kükürt üretimi ise İzmir Aliğa, İzmit ve Kırıkkale’deki TÜPRAŞ rafinerilerinde yapılmaktadır. Çok uzun zaman öncelerden beri kükürt, dünyada çok önemli bir element olarak birçok alanda kullanılmıştır. Dünyada; Volkan yatakları ve evaporitten çıkarılan elementel kükürdün yanında doğalgaz, petrol ve petrol yatakları, metal sülfidler olarak yaklaşık 5 milyar ton kükürt olduğu tahmin edilmektedir. Bunun yanında alçı ve anhidritteki kükürt neredeyse sınırsız olması ile birlikte kömür, petrol şeyli ve organik madde bakımından zengin şeyilde 600 milyon ton kükürt içeriği bulunmaktadır. Bu kaynaklardan üretim yapabilmek için düşük maliyetli çıkartma yöntemlerinin geliştirilmesi gerekmektedir. Kükürt dünyanın tamamının maden bileşenlerinin beşte birine denktir.

## 2.2. Kükürtlü (Susuz) Betonların Gelişimi

Yapı malzemesi olarak kullanılan ve tarihi çok eskiye dayanan Portland çimentosu, estetik ve yüksek dayanımlı olması ile gelenekselleşmiş bir beton türüdür. Geleneksel beton, çimento, su ve agregadan oluşmaktadır. Teknolojik ilerleme ve yeni nesil malzemelerin geliştirilmesi, ayrıca çevre koruma ile ilgili mevzuatın iyileştirilmesi, teknolojilerin yoğun bir şekilde ilerlemesine ve doğal gaz, ham petrol ve petrol ürünlerinden kükürdün çıkarılmasına yönelik yöntemleri doğurmuştur. Dünyada var olan kükürt rezervlerinin yanında, yapay yollardan elde edilen kükürdün farklı alanlarda kullanılması için bilim insanları tarafından birçok çalışma yapılmıştır. İnşaat mühendisliği alanında ise kükürdün bağlayıcılık özelliklerinin geliştirilmesi ve taşıyıcı bir özellik kazanması için çalışmalar

devam etmektedir. Henüz PCB kadar gelişmiş ve yaygın olmasa bile, gelişen teknoloji ile kat edilen mesafelerin olduk fazla olduğu düşünülmektedir (Yang vd., 2014).

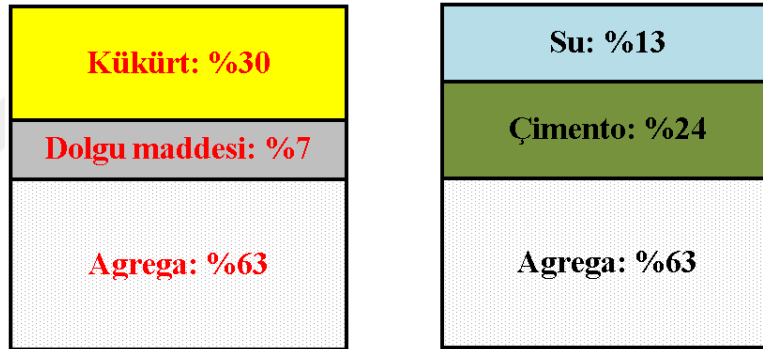
Dünyadaki enerji ihtiyacının her geçen gün hızla artması ve bu ihtiyacın büyük bir bölümünün petrol endüstrisi tarafından karşılanması, petrol endüstrisinden elde edilen kükürt miktarlarının artmasına neden olmaktadır. Petrol işlenmesi sonucunda elde edilen kükürdün artışı sadece petrol kullanımdaki artış değil aynı zamanda çevresel zararların azaltılması kapsamında yeni çevre kanun ve yaptırımlarının da getirilmesi olarak gösterilebilir. Artan kükürt üretimi, kükürdün yeni uygulamalarda kullanılması ihtiyacını temel zorunluluk haline getirmektedir. Günümüzde kükürt, inşaat sektöründeki bazı uygulamalar için iyi bir malzeme alternatifi olarak görülmektedir. Bağlayıcısı çimento olan geleneksel betonlara alternatif olarak, kükürt bağlayıcılı betonlar diğer inşaat malzemeleri arasında yerini almakta ve önemi gittikçe artmaktadır.

Kükürt bağlayıcılı betonlar, bağlayıcı olarak kükürt ve agreganın karıştırılmasıyla hazırlanmaktadır. Bağlayıcı olarak kullanılan kükürt ısıtılarak sıvı faza getirilmekte ve böylece geleneksel betondaki çimento+su ihtiyacını kükürt tek başına karşılamaktadır. Bu nedenle kükürt bağlayıcılı betonlar literatürde “waterless concrete - susuz beton” olarak da geçmektedir (Yue vd., 2006). Atık kükürdün popüler uygulamalarından biri de beton teknolojisinde kullanma denemeleri olmuştur. Kükürtlü beton, inşaatın birçok alanında kullanılarak geleneksel Portland çimentosu betonunun yerini alabilecek nispeten yeni bir yapı malzemesidir. Tüm dünyada çağdaş deneyimler, çimento yerine bir bağlayıcı olarak kükürt içeren betonun, Portland çimento betonu ile karşılaştırıldığında önemli kimyasal, mekanik ve dayanıklılık özellikleri açısından avantajlara sahip olduğunu göstermektedir.

Geleneksel Portland betonunda çimentonun sağladığı bağlayıcılık, kükürtlü betonlarda kükürdün eritilmesi ile elde edilir. Susuz betonu yeni bir yapı malzemesi sınıfına sokan önemli özelliklerin başında, üretimi, yerleştirilmesi ve kür süresi gelmektedir. Bu çalışmada, özel beton olarak da adlandırabileceğimiz susuz beton (kükürtlü beton) hakkında detaylı bilgi verilecek ve çeşitli fiziksel ve mekanik deneyler ile kükürtlü beton ile Portland çimentosu betonu karşılaştırılacaktır (Zhihui vd., 2013). Karışıma konulan tüm malzemelerin 100-120 °C arasındaki sıcaklıklarda karıştırılmasından dolayı kükürt bağlayıcılı betonlar imalat açısından sıcak beton olarak da isimlendirilmektedir. Geleneksel

Portland çimento betonlarında bağlayıcı miktarını anlatan dozaj tanımı kükürt bağlayıcılı betonlar için karışıma giren kükürt miktarını tanımlamaktadır ve aynı birim ile ölçülür.

Yüksek basınç dayanımı, hızlı priz alması, düşük geçirgenlik ve asitlere ve tuzlu ortamlara karşı yüksek direnç göstermesi kükürt bağlayıcılı betonların dikkat çekici özelliklerinin başında gelmektedir (Wan vd., 2016). Günümüzde beton teknolojisi hızla ilerleyerek başarılı sonuçlar elde edilmiştir. ‘Akıllı betonlar’ adı ile anılan bu yeni nesil betonlar farklı ortam koşulları ve farklı amaçlara hizmet adına tasarlanmaktadır. Bu doğrultuda geleneksel betonun çevreye ve ekonomiye verdiği bazı olumsuz özellikleri giderilerek daha çevreci, maliyeti düşük ve fonksiyonel beton çeşitleri yapı sektörüne kazandırılmaktadır. Aşağıdaki şekil 2.5’de kükürtlü beton ile geleneksel Portland çimentolu betonun karışım oranları verilmiştir. Buradan da anlaşılaacağı üzere yaklaşık aynı oranlarda çimento yerine kükürt kullanımı, beton karışımındaki su miktarını ortadan kaldırmaktadır.



Şekil 2.5. Kükürtlü beton ve Portland çimentosu betonunun karışım oranları

Kükürtlü beton, önceden ısıtılmış agrega ve erimiş halde bulunan kükürt mekanik bir karıştırıcı içerisine konularak en az 20 dk süre ile karıştırıldıktan sonra önceden ısıtılmış olan kalıplara yerleştirilir ve oda sıcaklığında soğumaya bırakılarak KB hazır hale getirilmektedir. Özel bir çalışma olan kükürtlü betonun oluşmasını sağlayan ana maddesinin kükürt olduğu görülmektedir. Literatür araştırmalarına bakıldığında kükürdün kullanımının çok eskilere dayandığı görülmektedir. 1921’de %40 kükürt içeren harçla yapı malzemesi üretilmiştir. Asidik ortama karşı yüksek direnç göstermiştir ve mekanik özellikleri de olumlu sonuçlar vermiştir ancak sıcaklık değişimleri ile eğilme dayanımlarının azaldığı

görülmüştür. 1940 yılında kükürtle ilgili çalışmalar geliştirilmiş viskozitesi arttırılarak endüstriyel asidik ortamlarda kullanımı incelenmiştir.

1960 yılında, bu malzemenin viskozitesi üzerinde çalışılmış ve 1970 yılında dayanıklılığı ile ilgilenilmiş ve Kuzey Amerika'da başarılı çalışmalar yürütülmüş ve endüstriyel yapılarda çalışılmıştır. Susuz beton üretim teknolojisindeki ilk kayda değer gelişmelere 1970'li yıllarda yapılan çalışmalarda rastlanmaktadır. ABD Maden İşleri Dairesi ve Kükürt Enstitüsü, 1971 yılında kükürdün kullanımı ile ilgili araştırma ve geliştirme kapsamında ortak bir çalışma başlatmıştır. Yapılan detaylı çalışmaya göre kükürdün yapı malzemesi olarak kullanılması kararlaştırılmıştır. ABD Maden İşleri Dairesi, kükürdün ticari amaç doğrultusunda 1976 yılından önce kullanılmaya başlanmasını hedeflemiştir. 1972 yılında ise Kanada Mineral ve Enerji Teknolojisi Merkezi ile Kanada Ulusal Araştırma Konseyi araştırma programına kükürdün yapı malzemesi olarak kullanılmasını almışlardır.

Kanada'daki diğer üniversiteler takip etmiştir. Beton ile ilgili ilk ciddi test çalışmalarına ise 1977 yılında ABD Maden İşleri Dairesi ile Kükürt Enstitüsü'nün ortaklaşa üstlendiği program kapsamında başlanmıştır. Bu program kapsamında, öncelikli olarak ön dökümlü yapı elemanları olarak tanımlanan fayans, döşeme, depolar ve pompa istasyonlarının temelleri test edilmiştir. 1979 yılı kışında ise her biri 1.730 kg ağırlığında olan toplam 750 adet kanalizasyon borusu Kanada'nın Alberta eyaletinin kuzey bölgesinde yer alan sahada başarı ile dökülmüştür. 1980'lerde, kükürtlü beton, ABD'de inşa edilen birçok otoyol ve sanayi katının yapımında kullanılan yapı malzemelerinden biri haline gelmiştir (Khademi ve Sar, 2015).

Kükürtlü betonun kullanım alanları boru hatlarından endüstriyel tanklara, yüzey kaplamalarından kaldırımlara ve derz dolgusu bileşenlerine kadar uzanmaktadır. Kükürtlü beton çalışmalarıyla ilgili alınan ilk patentlerde yaygın kullanımı yüzey kaplamaları, asit etkisine dayanıklı boru hatları gibi alanlar için uygun görülmüştür. Zamanla gelişen yorumlama yeteneğimiz sayesinde geçmişte sadece kısıtlı alanlarda kullanılan kükürdün daha uygun alanlarda ve daha çok verim elde ederek kullanılabileceği görülmüştür.

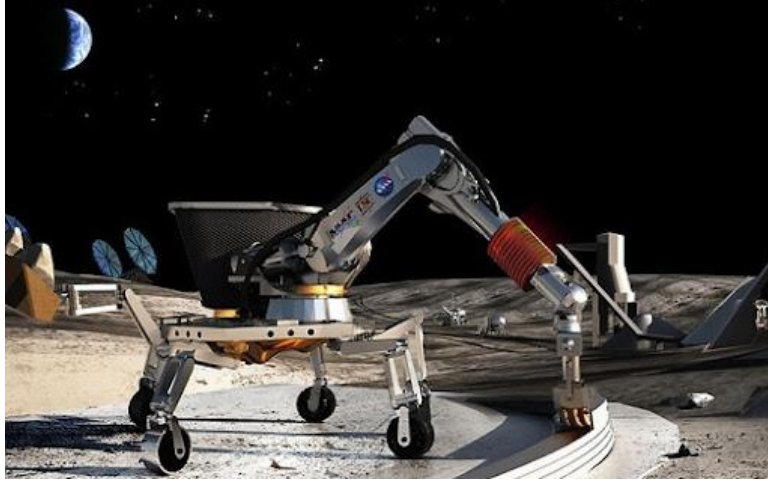


Şekil 2.6. Portland betonu ve kükürtlü betonun iç yapısı (Tunç ve Demirtürk, 2016).

Portland çimentosu betonu 28 günlük süreçte tam dayanımına yaklaşırken, kükürtlü beton sadece 24 saat içinde dayanımının %80'ini tamamlar. Ayrıca yapılan araştırmalarda, kükürt çimentolarının korozyona karşı iyi bir dirence sahip olduğu ve çeşitli temel yapısal kullanımlar için kullanılabileceği kabul edilmiştir. Susuz beton, üretim tekniği itibarıyla geleneksel betondan farklı olarak ısıtma işlemi sonucunda elde edilir. Karışımındaki agregalar, öncelikle kuruma, sonrasında ise kükürdün erime noktasından (119 °C) daha yüksek bir sıcaklığa kadar ısıtma işleminden geçirilir. Kükürt, 119 °C'de erir ve 149 °C'nin üzerinde ise viskozitesini hızlı bir şekilde kaybeder. Bu nedenle pek çok literatürde; karışımın taşıma, yerleştirme ve uygun bitiş verilebilmesi için uygun çalışma aralığı 132 °C ile 141 °C olarak tanımlanmıştır.

### 2.3. Kükürtlü Betonların Kullanımları ile İlgili Literatür Araştırması

Su içermediği halde kükürdün bağlayıcı özelliği kazanabilmesi, kükürtlü betonu dünya dışında kurulacak olan yerleşimlerin kurulumunda kullanılabilecek en uygun malzeme olarak ön plana çıkarmaktadır. Uzun araştırmaları tarihi boyunca ay gezegenimize olan yakınlığından dolayı en çok ilgi uyandıran gök cismi olmuştur. Minimal atmosferi, uzun geceleri ve hassas hareketleri ile bilinen ay, derin uzay astronomisi için ideal bir uydudur. Gelecekte ay, uzay gemilerinin yakıt ikmali yapacağı ve diğer gezegenlere doğru yola çıkacağı bir üs olacaktır. Tasarımı yapılacak Ay yapılarının yüksek dayanıklılık, sertlik, delinme ve ısı direnci gibi koşulları yerine getirebilmelidir. Ay'da yapılar inşa etmek için, güç, üretim ve tedarik maliyeti göz önünde bulundurularak uygun malzemeleri seçmek gerektiği belirtilmiştir. Kükürt bağlayıcılı betonların uzayda kullanılabilişliğinin araştırılması amacıyla birçok araştırmacı tarafından ay zemininden kükürdün elde edilebilirliği, darbe dayanımı, uzay radyasyonu gibi uzayda karşılaşılabilecek etkenler göz önünde bulundurularak alternatif deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2.7. Robotik aletler yardımı ile Ayda beton dökümü tasarımı (Yuan vd., 2016)

Beton imalatında çimento ve su çok önemli rol oynayan iki malzemedir. Ayrıca ayda sıvı halde su bulunmadığı göz önüne alındığında kullanılacak olan suyun dünyadan taşınması mümkün olmayacağından yapı imalatında su bazlı çimento kullanılması mantıklı olmayacaktır. Yapılan araştırmalara göre dünyadan Ay'a bir kilogram yükün taşınma maliyeti 100,000 \$ civarındır.

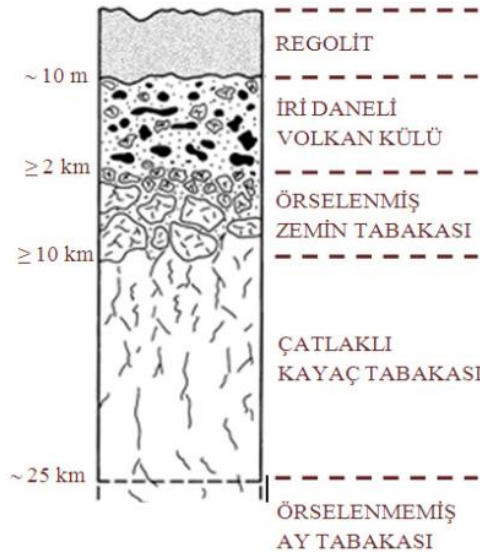
Ay toprağının hem kükürt içermesi hem de yüzeyinde kükürdün regolit halinde bulunması kükürdün ayda yapılması düşünülen yapılar için kükürtlü beton şeklinde ideal bir malzeme olabileceğini göstermiştir. İnsanlı uzay seferlerinden önce ayda robotlar ile sürdürülebilir yaşam alanlarının otomatik yapı üretim sistemleri ile sağlanabileceği görülmüştür. Yeni nesil robotik aletler yardımı ile 3B (üç boyutlu) yapım teknolojisi iyiden iyiye gelişmiş, kalıp kullanmaksızın katmanlı bir şekilde beton üretimi gerçekleştirilebilmektedir. İnşaatın bütün adımlarında bu teknoloji sayesinde daha hızlı yapılacaktır. Özellikle karmaşık yapılar için inşaat verimliliğini artırarak teknolojiye fayda sağlayacaktır. NASA 2010 yılında Güney Kaliforniya Üniversitesi'nden Profesör Khoshnevis ile 3B yazıcı tekniğiyle uzay yapılarının inşa edebilmesi için çalışma başlatmıştır. Yapılan çalışmalarda, yapıların malzemelerinin %90'ı Ay'dan, %10'u ise dünyadan temin edilecek biçimde tasarlanmıştır (Hou vd., 2019).



Şekil 2.8. Ayda susuz beton kullanılarak oluşturulan tasarım (Yuan vd., 2016; Danış,2021)

Geleneksel beton, agrega ile karıştırılmış bir bağlayıcı çimento ile su içermektedir. Ay yüzeyinde kullanılabilir su olmaması nedeniyle, ay yüzeyinde inşa edilmesi planlanan yapıların susuz beton ile üretilmesi mümkün olabilecektir. Susuz beton elde edilmesiyle ilgili çalışmalar Ay'da bol miktarda bulunan bağlayıcılık özelliği gösteren malzemelerin incelenmesi doğrultusundadır. Dünyada kullanılan yapı malzemelerinin Ay'da kullanılacak olan yapı malzemelerine bir kılavuzluk yapması amacıyla bir karşılaştırma yapılmıştır. Ay toprağının düzensiz olması ile ilgili incelemelerde bulunulmuş, mekanik özellikleri de belirlenmiştir. Ay regoliti temel olarak karmaşık birçok bileşenli malzemedir kayalar, mineraller ve vitröz gövdelerden oluşmuştur. Beton, ay ortamı için uygun bir yapı malzemesi gibi görünmekle birlikte, temel bileşenlerinden biri olan su, Ay'da oldukça az bulunan bir kaynaktır. Ay regolitinin yüksek sıcaklıkta işlenmesi yoluyla yerinde üretilmelidir. Olası bir alternatif, betonun (çimento ve su) bağlayıcı karışımının, ay yüzeyindeki en bol miktarda bulunan uçucu madde olan kükürtle değiştirilmesidir (Koh vd., 2010).

Sonuç olarak, yapılan çalışmalar ile kükürdün bağlayıcı olarak çimentonun yerine kullanılabileceğini ispatlamaktadır. Bu beton türünde bağlayıcılık özelliği kükürtle sağlanmaktadır. Kükürtlü betonun geleneksel beton arasındaki en önemli fark susuz olmasıdır. Susuz beton, kükürtlü beton olarak da adlandırılmaktadır. Ayrıca kükürtlü betonunun çekme dayanımı ve eğilme dayanımlarının yanı sıra yorulma dayanımı, geleneksel Portland çimentolu betona göre daha büyüktür, nihai basınç dayanımının %70-80'i 24 saat içinde alması avantajları arasındadır. Korozyon direncinin yüksek olması da diğer avantajları arasında yer almaktadır. Prekast endüstrisi içinde uygun olduğu düşünülmüştür. Bordürler, lağım boruları, korozyona dayanıklı blok veya panellerde uygulanmak için uygun olduğunu belirtilmiştir.



Şekil 2.9. Ay zemininin katmanları (Tunç ve Demirtürk, 2016)

Bu çalışmalar suyun bulunmadığı yerlerde kullanım için uygun olabileceği düşünülmüştür. Özellikle Ay, Mars gibi yerlerde kullanımı araştırılmıştır. Uzay üssü yapımında kullanılacak malzemelerin, olumsuz hava koşullarına, tektonik hareketlere, zararlı radyasyon ışınlarına karşı yüksek dayanımlı olması gerekmektedir. Beton yapısı gereği bütün bu özellikleri bünyesinde barındıran önemli bir malzemedir. Araştırmacılar beton yapımı için gerekli malzemelerin Ay'da bulunması ve olmayanların oraya temini konusunda incelemeler yapmış ve uygulanacak en optimum sistemin kükürtlü (susuz) betonlar olabileceğine kanaat getirmişlerdir. Bu yeni nesil betonlar ile en önemli problem olan suyun teminine gerek kalmayacaktır. Konuya ilişkin olarak, Toutanji, 2012 yılında kükürtlü betonun alternatif bir yapı malzemesi olarak Ay'daki uygulamalarda kullanılabileceğini yaptığı deneysel çalışmalarla göstermiştir.

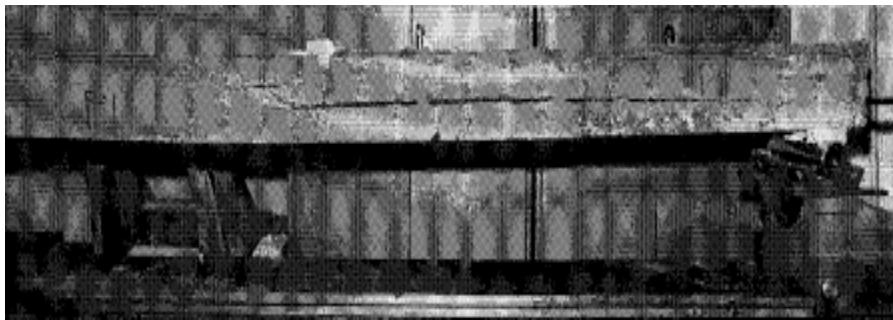
Ay'da nefes alabilmemizi sağlayan bir atmosfer mevcut değildir. Fakat regolit olarak adlandırılan ince tozdan basit işlemlerle elde edilebilen %40'dan fazla oksijen içerdiği belirtilmiştir. Ay toprağı ayrıca yüksek konsantrasyonlarda silikon, alüminyum içermekle birlikte; demir, magnezyum ve titanyumun yanı sıra daha az miktarda krom, mangan ve kükürt içerdiği belirlenmiştir. Bu bileşenler nedeniyle imalat ve inşaat malzemeleri için çıkarılabilir ve kullanılabileceği düşünülmüştür. Sonuç olarak, yürütülen bilimsel çalışmalar su yerine alternatif olarak kükürt kullanılabileceğini göstermiştir. Gelecekte Ay'a ya da Mars'a bir yerleşim kurma fikri zor bir hedef olsa da konu ile ilgili dünya dışı inşaat

alışmaları devam etmektedir. Bu çalışmada kükürtlü betonlara ait çalışmalar incelenmiş ve bu betonların işlenebilirlik, dayanım, dayanıklılık ve maliyetlerine ait sonuçlar verilmiştir.

Kükürtlü betonun işlenebilirliği ile ilgilide bazı araştırmalar yapılmıştır. Yapılan çalışmalarda işlenebilirlikle ilgili önemli detaylara dikkat çekilmiştir. Dayanım ve dayanıklılık kadar önemli olan işlenebilirliğe önem verilmiştir. Döküm sırasındaki detaylar, perdahlama, yatay-düşey deformasyonlar ve katmanlar arası bağlar incelenmiştir.

Kükürtlü beton ile ilgili çalışmaların başında 1974 yılında Loov'un yaptığı çalışma gelmektedir. Loov (1974) alışmasında Portland imentolu beton ile kükürtlü betonu karşılaştırmıştır. Kükürtlü beton ile kirişler dkmştir. Calgary niversitesinde n çalışmalar yapılmıştır. Çalışmada Portland imentolu betonda imento, su ve hava değerleri hacmin %30'unu oluştururken, kükürt ve hava hacmin %26'sını oluşturmaktadır. Dolgu malzemesi olarak iri agrega ve kum kullanmıştır. İri agrega 232  C 'de (450 F) ısıtılıp üzerine kükürt eklenmiştir. Kükürt eridikten sonra kum ve uçucu kül ilavesi yapılmıştır.

Çalışmada dökülen kirişlere vibrasyon kullanılmamış, çalışmada kirişleri doldurabilmek için mikser kapasitesi yetmemiştir ve bu nedenle 3 kat şeklinde döküm gerçekleştirilmiştir. Loov'a göre kükürtlü beton döküm sırasında yeterince sıcak değilse ince soğuk derz oluşabilir. Kükürtün kristalize olduğunda bzleceğini ve st yüzeyinin sertleşeceğine dikkat çekmiştir. Kristalize malzemenin oldukça hızlı bir şekilde oluşur bu nedenle malalamanın zor olduğunu belirtmiştir. Kükürtlü betonun kristalleşme sıcaklığının çok üzerinde iken pürüzsüz bir yüzey ve mükemmel yapıştırma elde edileceğini belirtmiştir (Loov vd., 1974).



şekil 2.10. Kükürtlü betonlu kirişteki yatay soğuk derz (Loov vd., 1974).

2016 yılında yapılan diğer çalışma ise Yuan vd'nin Mars ve toprağı benzeri bir agrega ile kükürt ve uçucu kül eklemeli üretim yöntemini denemişlerdir. Bu çalışmada %65 Mars toprağı benzeri ve %35 kükürt 150 °C'de 120 rpm burgu rotasyon hızı ile üretilmiş olup, %65 ay toprağı benzeri ve %35 kükürt 135 °C'de 60 rpm burgu rotasyon hızı ile üretilmiştir. Eklemeli üretim ile 3 tabaka numune üretilmiştir. Numunelerin yatay ve dikey deformasyonları incelenmiştir. Yuan, vd'nin diğer bir çalışması da kum, uçucu kül, bitüm ve kükürt karışımının 160 °C'de eritilerek kükürtlü beton üretimidir. %10 uçucu kül kullanılarak 140-155 °C'de 1-2 saatlik üretilen numunelerde yatay deformasyonun daha az olduğu görülmüştür. İki saatlik eritilen numunelerin renklerinin 1 saatlik eritme sonrası üretilenlere göre daha koyu olduğu belirtilmiştir (Yuan vd., 2016).



Şekil 2.11. Kükürtlü beton ile üretilmiş numuneler (35, Al-Otaibi, vd., 2019).

Al-Otaibi, vd'nin 2019 yılında yapmış oldukları çalışmada modifiye kükürt, uçucu kül, KNPC bitüm (Kuveyt Uluslararası Petrol Şirketi) kullanarak kükürtlü beton üretmişlerdir. Döküm sırasında sıcak kalıp ve soğuk kalıp kullanılmıştır. Üretim öncesi ve üretimi sırasında kükürtlü beton üretim sistemi karıştırmadan bu yana kontrol sıcaklığında yapılmalı ve döküm sıcaklığının çok önemli olduğunu belirtmişlerdir. Meydana gelen tepkime hızının elde edilen maddenin bağlanma kabiliyeti üzerinde etkili olduğu dikkat çekmiştir (Al-Otaibi vd., 2019).

Farklı dolgu malzemeleri farklı oranlarda kullanıldığı aşağıdaki literatür araştırmasında kükürtlü betonun basınç dayanım değerleri incelenmiştir. 1974 yılında Loov vd'nin yaptığı çalışmada dökülen kirişlere vibrasyon kullanılmamıştır. 28 günlük dayanım sonuçları karşılaştırıldığında her ikisinin de 41.37 MPa (6 k/in<sup>2</sup>) olduğu kaydedilmiştir. Kükürtlü beton çalışmalarından bir diğeri de 1993 yılında Omar tarafından gerçekleştirilmiştir. Farklı oranlarda kükürt ile ay toprağı (regoliti) benzeri malzemenin 150

°C’de karıştırılıp eritilmesi ile gerçekleştirilmiştir. Eritilen sülfürlü beton 50,8 mm boyutlarında metal küplere dökülmüştür. Çekiçe vurularak sıkıştırılmıştır. Çizelge 2.2’de lif eklenmemiş kükürtlü beton dayanım sonuçları görülmektedir. Dayanım sonuçlarında %35 kükürt oranlı kükürtlü betonda en yüksek dayanımın 33.8 MPa olduğu görülmektedir. Çekme dayanımlarımda %35 kükürt oranlı beton daha iyi sonuç vermiştir (Omar, 1993).

Çizelge 2.2. Kullanılan kükürt oranına göre dayanımların değişimi

| % Kükürt                 | 25   | 30   | 35   | 40   | 50   | 60   | 70   |
|--------------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| Numune sayısı            | 3    | 9    | 9    | 10   | 6    | 6    | 6    |
| Ortalama Basınç Dayanımı | 6.07 | 24.0 | 33.8 | 25.4 | 24.7 | 25.0 | 15.7 |
| Ortalama Çekme Dayanımı  | 0.33 | 2.9  | 3.7  | 2.0  | 2.7  | 2.6  | 1.4  |

Toutanji, vd.’nin yapmış olduğu çalışmada %35 kükürt (saf kükürt-silika kükürt) ve %65 oranında ay toprağı regoliti benzeri malzeme karıştırılmıştır. Çalışmada eritmenin gerçekleşeceği yer önceden 145 °C’ye kadar ısıtılmıştır. Önce kükürdün yarısı dökülmüştür daha sonra agregaların yarısı ilave edilmiştir. İşlem tekrarlanmıştır. Sıcaklık 140 °C 50.8 mm’lik kalıplara dökülmüştür. Basınç dayanımı sonucunda 22 MPa değer kaydedilmiştir.

Vlahovic vd’nin 2011 yılında yapmış oldukları çalışmada kükürtle birlikte en büyük tane çapı 2 mm olan agregaya ve ayrı ayrı talk, alümin, mikro-silika ve uçucu külle kükürtlü betonlar yapmıştır. Burada dolgu maddesi seçimi önemlidir çünkü agregaya parçacıklarını kaplayan ve bağlayan kükürtlü macun ile oluşur. Dolgu maddelerinin ana fonksiyonları: kükürt-dolgu macununun viskozitesini kontrol etmek ve kristal oluşumu ve büyümesi için nükleasyon bölgeleri sağlamak, agregadaki boşlukları doldurmak ve dolayısıyla gerekli kükürt miktarını azaltmak, büzülme sırasında çekmeyi azaltmak olarak sıralanabilir. Talk, mikro silika ve uçucu kül, bu istekleri karşılayan dolgu maddeleridir. Bu nedenle kükürt betonu üretimi için önerilen malzemelerdir. Dayanıklı betonların dolgu maddeleri olarak ince kalsine alüminalar kullanılır. Seçilen tüm dolgu maddelerinin ortak özelliği, parçacık boyutunun 75 um’nin altında olmasıdır (Vlahovic vd., 2011).

Dolgu içeriği, karışımın reolojisi üzerindeki etkisine göre ve en yüksek beton yoğunluğuna ulaşmak için seçilmiştir. Karşılaştırma örnekleri için, aynı zamanda Portland çimentosu beton numuneleri, kükürt betonu, Portland çimentosu ve su / çimento oranı 0,5 olan aynı agregaya ile yapılmıştır. Betonun fiziko-mekanik özelliklerini incelemek için ölçüleri

(4x4x16) cm olan prizma numuneleri hazırlanmıştır. Çizelge 2.4’de oda sıcaklığında kürlenmeden 24 saat sonra referans kükürt beton numunelerinin ve referans 28 gün süreyle oda sıcaklığında kürlenmeden sonra Portland çimentosu beton numunelerinin fiziko-mekanik özellikleri verilmiştir (Vlahovic vd., 2011).

Çizelge 2.3. Farklı beton çeşitlerinin dayanım değerleri

| Örnek                      | Yoğunluk<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | Dayanım (MPa)<br>Basınç Eğilme | Görünür<br>porozite<br>(%) |
|----------------------------|----------------------------------|--------------------------------|----------------------------|
| Talklı kükürt beton        | 2.33                             | 55.4 8.3                       | 3.14                       |
| Alüminalı kükürt beton     | 2.34                             | 49.2 8.4                       | 1.38                       |
| Mikrosilikalı kükürt beton | 2.31                             | 50.3 7.2                       | 3.21                       |
| Uçucu küllü kükürt beton   | 2.25                             | 48.9 7.8                       | 4.93                       |
| Portland çimentosu betonu  | 2.18                             | 46.3 6.9                       | 16.3                       |

Hazırlanan numunelerin özelliklerini kükürt betonu ile literatüre göre karşılaştırarak, mekanik dayanım bakımından, çeşitli dolgu maddelerine sahip numunelerin tamamen tatmin edici kalitede olduğu sonucuna varılabilir. Kükürt betonu referans numunelerinin mekanik dayanım ve görünür gözeneklilik değerlerinde karşılıklı farklılıklar, muhtemelen tüm örneklerde diğer bileşenler aynı olduğundan, uygulanan dolgu maddelerinin fiziksel ve kimyasal özelliklerinden kaynaklanmaktadır.

Gracia vd’nin yapmış oldukları araştırmada bağlayıcı olarak Şili rafinerisi RPC’de (Refinería de petróleo de ConCón) bir yan ürün olarak elde edilen kükürt kullanılırken, dolgu maddesi ise Aconcagua nehir yatağından bazaltik kayaç kullanılmıştır. Çalışmada kükürt harç ve kükürtlü beton denemeleri yapılmıştır. Kükürt harçları için %30 bağlayıcı miktarı (en büyük agrega boyutu 2,5 mm) ve kükürt betonları için %15 bağlayıcı miktarı (en büyük agrega boyutu 10 mm) kullanıldığı, ayrıca mineral dolgu maddesinin kükürt miktarının harçlar için yaklaşık %5 ve betonlar için %10 olması gerektiği belirtilmiştir. Granülometrik eğriyi istenilen özelliklerde tamamlamak için kükürt harçlarında yerel kullanımı olan kaolin ve karbon karası kullanılmıştır. Deney sonuçları Çizelge 2.5’de görülmektedir. Yapılan çalışmada 10 x 10 x 28 cm’lik numunelerde, en büyük dayanımın %80’inin dökümden yaklaşık 3 saat sonra elde edildiği belirtilmiştir (Garcia, 2004).

Çizelge 2.4. Kükürtlü harç ve betonların dayanım özellikleri

| Özellikler                            | Kükürtlü Harç | Kükürtlü Beton |
|---------------------------------------|---------------|----------------|
| <b>Basınç Dayanımı (MPa)</b>          | 70-75         | 50-60          |
| <b>Eğilme Dayanımı (MPa)</b>          | 12-13         | 8-10           |
| <b>Dolaylı gerilme Dayanımı (MPa)</b> | 5-6           | 5              |
| <b>Büzülme (mm/m)</b>                 | 0.6-0.7       | 1.4            |

Narmin ve diğ. tarafından 2008 yılında modifiye kükürt kullanılan kükürt harçların hazırlanmasında reaksiyon sıcaklığının ve ısıtma süresinin kükürt harcının mekanik özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Erimiş kükürt 130-140 °C'de olefinik katkı maddesi ile reaksiyona girmiş ve daha sonra önceden ısıtılmış filler ve ince agregaya ile karıştırılarak numuneler hazırlanmıştır. Reaksiyon süresi olarak 0,5, 1, 2 ve 3 saat seçilmiştir. Reaksiyon süresi uzadıkça basınç dayanımının da arttığı belirlenmiştir. Modifikasyon için 140 ve 160 °C olmak üzere iki farklı reaksiyon sıcaklığı belirlenmiştir. Sıcaklık 140 °C'nin üzerine çıktığında basınç dayanımında azalma olduğu görülmüştür. İdeal karıştırma sıcaklığı 140 °C olarak belirlenmiştir. Harç numunelerin karışım oranları ağırlıkça %32 erimiş kükürt, %10 filler ve %58 ince agregaya olarak belirlenmiştir. Filler olarak silis dumanı, mika ve karbon kullanılmış ve silis dumanı kükürt bağlayıcılı betonlarda olan koku problemini azalttığı görülmüştür.

Kükürtlü betonların tamir betonu olarak kullanılabilirliği 2010 yılında Pouya ve diğ. tarafından araştırılmıştır. 38 °C sıcaklık ve yüksek nem oranı bulunan Basra körfezi koşullarında numuneler küre tabii tutulmuştur. Tamiratta kullanılan harçların basınç dayanımlarının yüksek olması gerektiğinden, susuz betonla hazırlanan bu harçların basınç, eğilme ve çekme dayanımları test edilmiştir. Bunun yanında tamir harçlarının yüzey ile arasındaki aderansında yüksek olması şarttır. Bu nedenle harçların yapışma kuvvetleri ve su geçirimsizlikleri de kontrol edilmiştir. Kükürtlü betonlar diğer tamir betonları kadar etkin bir performans göstermese de belirlenen bölge koşulları için yeterli performans gösterdiği belirlenmiştir (Puoya vd., 2010).

Kükürtlü betonarme yapılarda en önemli husus, harç içerisinde bulunan donatının korozyon aktivitesidir. 1989 yılında Al-Tayyib ve diğ. tarafından yapılan çalışmada kükürt içerisinde bulunan metalin korozyonu deneysel yöntemlerle araştırılmıştır. Bu çalışmada geleneksel Portland çimentolu betonlar ile kükürtlü betonların korozyon potansiyelleri ilk

olarak yarı hücre potansiyelleri belirlenerek karşılaştırılmıştır. Yapılan deneylerde, kükürtlü betonun içerisinde bulunan donatının Portland çimentolu betondaki donatıya göre daha geç korozyon oluşumu gösterdiği belirlenmiştir. Bu durum yalnız optimum karışım oranlarında geçerli olmuştur, donatı korozyonu kötü karışım oranlarında hızlı bir şekilde ilerlemiştir. Bu çalışma kapsamında yapılan bir diğer deney ise kükürtlü betonların elektriksel dirençleridir. Yaklaşık bir yıllık bir süre boyunca 24 farklı kükürtlü beton serisinin elektriksel öz direnç ölçümleri gözlemlenmiş ve sonuçlar geleneksel Portland çimentolu seriler ile karşılaştırılmıştır. Süre sonunda kükürtlü betonların korozyon başlangıçlarının Portland çimentolu serilere oranla daha uzun zaman aldığı gözlemlenmiştir (Al-Tayyib ve Khan, 1988).

Kolombiya’da doğal yollar ile elde edilen kükürt kullanılarak hazırlanan kükürtlü betonların performansı Dugarte ve diğ. tarafından 2018 yılında incelenmiştir. %70 agrega ve %30 kükürdün bulunduğu karışım optimum karışım olarak belirlenmiştir. Bu çalışmada diğer çalışmalardan farklı olarak aşınma, yoğunluk ve kimyasal dayanıklılık deneyleri uygulanmıştır. Sonuçlar göstermiştir ki, kükürtlü betonlar sülfatlı ortamlara maruz bırakılmalarından sonra bile basınç dayanımı sonuçlarında ve dayanıklılık özelliklerinde herhangi bir değişiklik olmamıştır. Genel olarak sonuçlar, susuz kükürtlü betonların yüksek kimyasal dayanıklılığa sahip olduğunu ve geleneksel Portland çimentosu alternatifi olarak güvenle kullanılabileceğini göstermektedir (Dugarte vd., 2018).

Al-Otaibi ve diğ. tarafından 2019 yılında yapılan bir çalışmada kaldırım ve yol kaplama parkesi olarak kükürtlü betondan imal edilmiş elemanların kullanımının alternatif bir yol olabileceği düşünülmüştür. Saf kükürt, modifiye kükürt ve agreganın döküm prosesinin belirlenmesi amacıyla alternatif döküm prosesleri de denenmiştir. En iyi mekanik özellikler %42 iri agrega, %40 doğal kum, %11,5 saf kükürt, %1,2 modifiye kükürt ve %5,3 oranında uçucu kül kullanılarak hazırlanan karışımlardan elde edilmiştir. Gerekli standartların sağlandığı parke taşı kullanımı için Kuveyt yönetmelikleri incelenmiştir ve bu çalışmanın uygunluğu hakkında yorum yapılmıştır. Deneyler sonucunda bulunan en uygun mekanik değerlerin, zemin kaplama malzemeleri ile ilgili değerleri karşıladığı belirlenmiş ve güvenle uygulanabileceği sonucuna varılmıştır.

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

Tez çalışmasının bu bölümünde, deneysel aşamalarda kullanılan numunelerin üretimi sırasında kullanılan malzemeler ve özellikleri, beton karışım oranları, numune kür koşulları ve numune üretim aşamaları hakkında bilgiler verilmiştir.

#### 3.1. Kullanılan Malzemeler

##### 3.1.1. Çimento

Tez kapsamında hazırlanan beton numunelerde ‘Çimsa’ firmasının üretmiş olduğu, TS EN 197-1 ve Avrupa standartlarına uyan, ISO 9001 Kalite yönetimi ve OHSAS 18001 İş sağlığı ve Güvenliği Yönetim Sistemleri tarafından sertifikalanmış, CEM I 42,5 R Portland çimentosu kullanılmıştır. Çimentonun kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri Çizelge 3.1’de gösterilmiştir (TS EN 197-1, 2012).

Çizelge 3.1. Çimentonun kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri.

|                     | Kimyasal Bileşim (%)              | CEM I 42.5 R |
|---------------------|-----------------------------------|--------------|
| Kimyasal Özellikler | SiO <sub>2</sub>                  | 19.67        |
|                     | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>    | 5.21         |
|                     | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>    | 2.68         |
|                     | CaO                               | 63.72        |
|                     | MgO                               | 3.01         |
|                     | Na <sub>2</sub> O                 | 0.92         |
|                     | K <sub>2</sub> O                  | 0.46         |
|                     | SO <sub>3</sub>                   | 2.13         |
|                     | MnO                               | ---          |
|                     | S                                 | ---          |
|                     | Cl                                | 0.006        |
|                     | Kızdırma Kaybı                    | 3.54         |
|                     | Çözünmeyen Kalıntı                | 0.5          |
|                     | Serbest Kireç                     | 1.85         |
| Fiziksel Özellikler | Özgül Ağırlık                     | 3.11         |
|                     | Özgül Yüzey (cm <sup>2</sup> /gr) | 3501         |
|                     | Elek Kalıntısı - 0.090mm (%)      | 0.31         |
|                     | Elek Kalıntısı - 0.045mm (%)      | 5.11         |
|                     | Standart Kıvam Su Miktarı (%)     | 28.3         |
|                     | Priz Başlama Süresi (dk)          | 180          |
|                     | Priz Sona Erme Süresi (dk)        | 270          |
|                     | Hacim Genleşmesi (mm)             | 1            |

### 3.1.2. Agregalar

Deneylerde Eskişehir’deki taş ocaklarından laboratuvara getirilen kalker esaslı kırma kum ve kırma taşlar kullanılmıştır. Kaba agregalar olarak kullanılan kırma taşların en büyük tane büyüklüğü 22 mm’dir. Karışım granülometrisinde kırma taş I, kırma taş II ve kum beton karışım serilerinde de belirtileceği üzere farklı oranlarda kullanılmıştır. Agregalar karışımının elek analizi ve fiziksel özellikleri Çizelge 3.2’de verilmiştir (TS EN 932-1, 1997; TS EN 933-1, 2010; ASTM C-127, 2007; ASTM C-128, 2015).

Çizelge 3.2. Agreganın elek analizi ve fiziksel özellikleri

| Elek Boyutu<br>(mm) | Kırma<br>Kum | Kaba Agregalar         |                          |
|---------------------|--------------|------------------------|--------------------------|
|                     |              | Kır. Taş I<br>(4-8 mm) | Kır. Taş II<br>(8-22 mm) |
| 31,5                | 100          | 100                    | 100                      |
| 16                  | 100          | 100                    | 69.3                     |
| 8                   | 100          | 58.3                   | 1                        |
| 4                   | 100          | 10.4                   | 0                        |
| 2                   | 62.4         | 0                      | 0                        |
| 1                   | 39.6         | 0                      | 0                        |
| 0.5                 | 29           | 0                      | 0                        |
| 0.25                | 16.4         | 0                      | 0                        |
| 0.125               | 0.4          | 0                      | 0                        |
| Elek Altı           | 0            | 0                      | 0                        |
| Birim Ağırlık       | 1.32         | 1.36                   | 1.38                     |
| Özgül Ağırlık       | 2.66         | 2.69                   | 2.69                     |
| İncelik<br>Modülü   | 2.37         | 5.42                   | 6.59                     |

### 3.1.3. Su

Beton karma suyu olarak laboratuvarımızda bulunan Eskişehir bölge suyu kullanılmıştır. Beton üretiminde kullanılan şebeke suyunun kimyasal analizi Çizelge 3.3’de gösterilmiştir. Şebeke suyunun yapılan kimyasal analizinde suyun TS 1247’deki karma suyu niteliklerine uygun olduğu görülmüştür.

Çizelge 3.3. Şebeke suyunun kimyasal analizi

| Parametre                               | Bulunan Değerler |
|-----------------------------------------|------------------|
| pH                                      | 6.85             |
| Kalsiyum (Ca) <sup>++</sup>             | 56.4 mg/l        |
| Magnezyum (Mg) <sup>++</sup>            | 84.9 mg/l        |
| Klorür (Cl) <sup>-</sup>                | 7.21 mg/l        |
| Sülfat (SO <sub>4</sub> ) <sup>--</sup> | 46.6 mg/l        |

### 3.1.4. Disiklopentadien

Yapılan deneylerde hazırlanan susuz beton karışımlarında disiklopentadien (DCPD) kullanılmıştır. Bu kimyasal sıvı bir polimerdir (Şekil 3.1.). Kullanılma sebebi kükürt eriyiğinin viskozitesini arttırması, priz süresini uzatması ve daha kolay kalıplanmaya imkân vermesidir. Ayrıca DCPD numunelerde yüzey gerilimini azaltarak çatlak oluşumunu önler fakat dayanıklılık sonuçlarını etkileyecek herhangi bir özelliği yoktur.

Disiklopentadien, sıvı kükürt ile kopolimerler oluşturabilen, potansiyel olarak ucuz bir malzemedir. Disiklopentadien, 140°C'de sıvı kükürt içinde her oranda çözünür ve kükürt-DCPD çözeltisinin eriyik viskozitesi, bir polimerizasyon reaksiyonu nedeniyle zamanla artar.

Çizelge 3.4. Disiklopentadien özellikleri

| Özellik                                      | Açıklama                                                                                        |
|----------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Renk                                         | Açık Sarı                                                                                       |
| Zararlılık Kategorisi                        | Alevlenir Sıvılar (H226)                                                                        |
| Erime Noktası                                | -33°C                                                                                           |
| Kaynama Noktası                              | 170°C                                                                                           |
| Alevlenirlik                                 | Kolay alevlenir sıvı ve buharlar sınıfı                                                         |
| Yoğunluk                                     | 0.98 gr/cm <sup>3</sup>                                                                         |
| Akut toksisite, cilt ve göz teması zararları | Yutulması halinde zararlıdır, solunması halinde toksiktir, ciddi cilt ve göz tahrişine yol açar |



Şekil 3.1. Enjektör yardımıyla disiklopentadien alınması

### 3.1.5. Kükürt

Yapılan bu tez çalışmasında, saflık oranı %99,9 olan kükürt rafine kükürt kullanılmıştır. Kullanılan kükürdün özgül ağırlığı 2,07 olarak bulunmuştur dolayısı ile çimentodan daha hafiftir. Bu kükürt Mikrotek kimya firmasından elde edilmiş (Şekil 3.2.) ve fiziksel ve kimyasal özellikleri aşağıdaki tabloda verilmiştir.



Şekil 3.2. Deneysel çalışmalarda kullanılan saf kükürt

Çizelge 3.5. Kükürdün fiziksel ve kimyasal özellikleri

| Özellik                                             | Açıklama                                               |
|-----------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| <b>Görünüm</b>                                      | Sarı renkli, toz halinde                               |
| <b>Koku</b>                                         | Çürük yumurta kokusu                                   |
| <b>Erime Noktası</b>                                | 119°C                                                  |
| <b>Donma Noktası</b>                                | 119°C                                                  |
| <b>Alev Alma Sıcaklığı</b>                          | 206°C                                                  |
| <b>Safılık</b>                                      | % 99,9                                                 |
| <b>Akut toksisite, cilt ve göz teması zararları</b> | Solunum yollarında, deride ve gözde tahrişe neden olur |

### 3.2. Kullanılan Aletler

Bu bölümde tez çalışması kapsamından kullanılan aletler ve özellikleri verilmiştir. Burada verilen bütün alet ve gereçler gerekli güvenlik önlemleri alındıktan sonra kullanılmıştır.

#### 3.2.1. Kapalı kükürt eritme ve döküm alanı

Deneysel çalışmalar için toz halinde temin edilen rafine kükürdün, katı halden sıvı hale geçerken açığa çıkarttığı zararlı gazlardan önceki bölümlerde bahsedilmiştir. Bu tez çalışmasında açığa çıkan zararlı gazların kontrol altına alınabilmesi için laboratuvarında bulunan mekanik havalandırmalı kapalı bir alan oluşturulmuştur. Bu alanda zararlı gazların doğrudan açık havaya çıkışını sağlayan sistem yardımı ile kükürtlü beton üretimi ve kalıplara döküm işlemleri yapılabilmiştir. Kullanılan kapalı alan Şekil 3.3.'da gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Deneysel çalışmalarda kullanılan havalandırmalı kapalı alan

### 3.2.2. Mekanik karıştırıcı

Beton dökümünün öncesinde ve sonrasında daha homojen bir karışım elde edebilme adına beş farklı hız ayarına sahip beş litre kapasiteli bir mekanik karıştırıcı kullanılmıştır. Laboratuvarımızda bulunan bu karıştırıcının resmi aşağıdaki Şekil 3.4’de verilmiştir ve sadece ince agrega içeren harç karışımlarında kullanılmaktadır. Kükürtlü betonun karıştırılması ise el ile yapılmıştır. Kükürtlü betonda karıştırıcı olarak mekanik aletler kullanılması için makinenin ısıtılması ve harcı soğutmaması gerekmektedir.



Şekil 3.4. Çimentolu karışımları hazırlamakta kullanılan mekanik karıştırıcı

### 3.2.3. Termometre

Karıştırma işlemi sırasında kükürdün sıcaklık ölçümü önemli bir parametredir. Bunun sebebi kükürdün belirli sıcaklık aralıkları dışında döküm yapılacak viskoziteye sahip olamamasıdır. Kükürt için en uygun döküm sıcaklığı 125-130 °C arasındadır. Bu sıcaklığın aşılması neticesinde kükürt karışımı akışkanlığını kaybederek kararmaya başlar. Kükürt karışımının gerekli viskoziteye sahip olduğunda zaman kaybetmeden kalıplara dökülmeli ve soğumaya bırakılmalıdır. Resimdeki sıcaklık ölçer yardımıyla erime zamanı belirlenmiştir.

Kükürt bağlayıcılı betonlar için en büyük risk, maruz kaldıkları ortam sıcaklığının 96 °C’nin üzerinde çıkmasıdır. Bu sıcaklık seviyelerinde beton dayanımını

kaybetmekte ve bu sıcaklığın üzerindeki sıcaklıklarda kükürdün erime noktasının geçilmesi ile bağlayıcı faz erimekte ve beton bütünlüğünü kaybetmektedir.

### 3.2.4. Kalıplar

Bu deneysel çalışmada sıcak beton dökümünde şekilde gösterilen 40x40x160 mm ve 70x70x70 mm ölçülerinde metal kalıplar kullanılmıştır (Şekil 3.5). Portland çimentolu beton dökümünde ve kükürtlü beton dökümlerinde aynı ölçülerde kalıplar kullanılmıştır.



Şekil 3.5. Deneysel çalışmalarda kullanılan kalıplar

Susuz beton yapımı sırasında laboratuvarımızda bulunan metal kalıplar kullanılmıştır fakat, burada dikkat edilmesi gereken nokta beton sıcaklığı ile kalıp sıcaklığının aynı olması gerektiğidir. Aksi takdirde beton karışımı hızlı bir şekilde soğur ve priz alır. Böyle bir durumda hem viskozite artarak yerleştirme sorunu ortaya çıkar hem de beton yüzeyinde ve çevresinde rötre çatlakları oluşur. Bu tür bir problemle karşılaşmamak adına sıcak beton dökümünden önce etüvde 120-130 °C derece aralığında 2 saat boyunca ısıtılmıştır.

### 3.2.5. Beton mikseri

Tez kapsamındaki geleneksel Portland çimentolu numunelerin hazırlanması için dakikada 30 devir hıza sahip 50 litre kapasiteli yatay ile 180° açı yaparak karışımı dökebilme

özelliğine sahip Utest marka elektrikli laboratuvar beton mikseri kullanılmıştır. Beton karışımı burada homojen bir şekilde karıştırılarak daha önceden hazırlanmış kalıplara dökülmüştür (TS EN 206:2013+A1, 2017). Beton mikseri Şekil 3.6’da gösterilmiştir.



Şekil 3.6. Çalışmalarda kullanılan beton mikseri

### 3.3. Beton Karışım Oranları

Deneysel çalışmalarda kullanılan kükürtlü beton ve geleneksel Portland çimentolu numunelerin karışım oranları bu başlık altında belirtilmiştir. Portland çimentolu numuneler için çimento dozajı  $350 \text{ kg/m}^3$  ve su-çimento oranı 0,5’tir. Metre küpte kullanılan diğer malzemelerin miktarları şu şekildedir; kum 825 kg, iri agrega 375 kg, ince agrega 655 kg. Kükürtlü betonlarda farklı agrega oranı ve katkı kullanılarak oluşturulmuştur. Susuz beton karışımları ve Portland çimentolu karışımların karışım oranlarının belirtildiği tablo aşağıda verilmiştir.

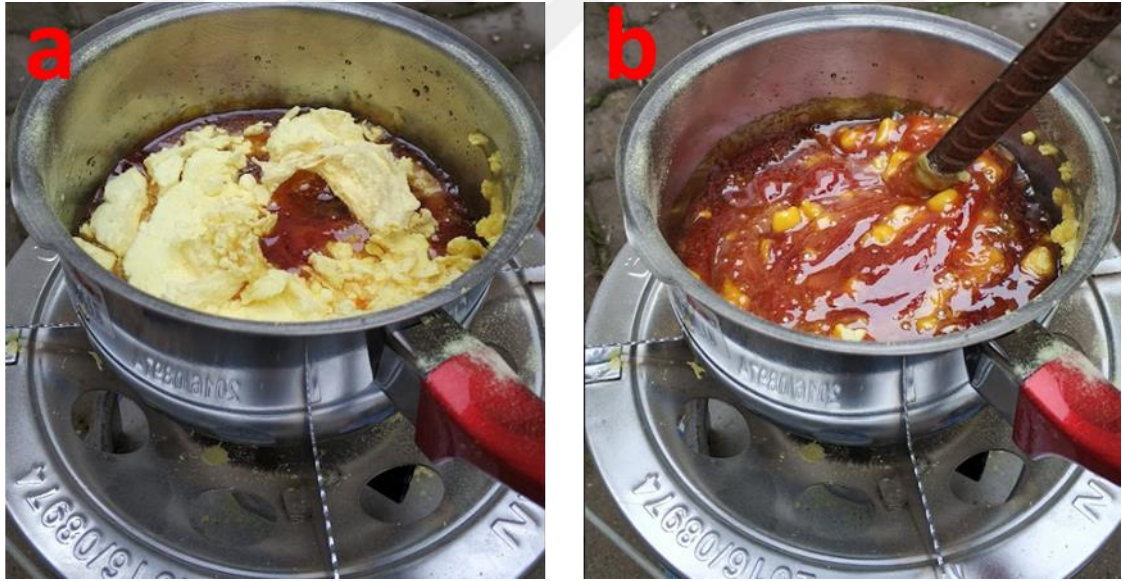
Çizelge 3.6. Beton karışım oranları

| Seriler | Kum           | Kırma taş I<br>4 mm | Kırma taş II<br>8 mm | DCPD       | Bağlayıcı  | Dökülen<br>Numune<br>Sayısı |
|---------|---------------|---------------------|----------------------|------------|------------|-----------------------------|
| Kontrol | 825kg (% 50)  | 655kg (% 30)        | 825kg (% 20)         | -          | 350 kg Çim | 20                          |
| KB      | 911kg (% 50)  | 546kg(% 30)         | 365kg (% 20)         | -          | 438 kg Kük | 30                          |
| KBD     | 883kg (% 50.) | 530kg(% 30)         | 353kg (% 20)         | 73kg (% 4) | 438 kg Kük | 30                          |
| K       | -             | -                   | -                    | -          | Kük (%100) | 20                          |

### 3.4. Numune Üretimi ve Kür Koşulları

Literatürde anlatılan imalat teknolojik prosedürüne göre kükürt betonunun hazırlanması, erimiş kükürt ve modifiye edilmiş kükürdün ısıtılmış ve homojenleştirilmiş kuru ve karıştırılmış kükürt erime sıcaklığında 132-141° C'de karıştırılmasından oluşmuştur. 2 dakika süren karışım, beton karışımı 120 °C'de önceden ısıtılmış kalıplara dökülmüş ve 10 saniye titreştirilmiştir. Kükürt betonunun çok önemli bir özelliği hızlı sertleşirmedir. Numunenin büyüklüğüne ve şekline bağlı olarak 1 saat ila birkaç saat arasındadır. Kalıptan çıkarmaya ve nispeten kısa bir sürede kurlenmeye izin verir (oda sıcaklığında 24 saat).

Bu çalışma kapsamında iki tür kür uygulanmıştır. Erken yaş ve ileri yaş olarak adlandırılan bu kür süreleri, betonların kükürtlü ve Portland çimentolu olmalarına göre değişiklik göstermektedir. Erken yaş olarak kastedilen, Portland çimentosu için 28 gün iken kükürtlü betonlarda 24 saati temsil eder. İleri yaş, Portland çimentolu betonda 90 günü temsil ederken, kükürtlü betonda 7 günü temsil eder. Beton üretimi Şekil 3.7.'de verilmiştir.



Şekil 3.7. Kükürtlü beton numunelerinin üretim aşaması a) Kükürdün erime aşaması  
b) Erimiş kükürtün karıştırılması ve homojenleştirilmesi



Şekil 3.8. Kükürlü betonların soğutulması ve kalıptan çıkartılması a) Prizmatik numunenin soğuma aşaması b) Küp numunenin soğuma aşaması c) Kalıptan çıkarılan numune

Geleneksel Portland çimentolu serilerin üretimimi sırasında yukarıda belirtilen laboratuvar mikseri kullanılmış ve vibratör yardımıyla kalıplar yerleştirilmiştir. Beton numuneleri oda sıcaklığında bir gün bekletilmiş ve hidrasyon reaksiyonlarının oluşması sağlanmıştır. Sertleşen numuneler Şekil 3.8.'de gösterilmiştir. Priz alma olayı numunelerde kalıbın dışından içerisine doğru gerçekleşmektedir. Ardından, numuneler kalıplarından çıkartılarak 28 gün boyunca kirece doymun su havuzunda bekletilmiştir. Numunelerin üretilmesi, kalıplanması, kür havuzuna konulmasıyla ilgili resimler Şekil 3.9'da verilmiştir.

28 günlük kür süresini tamamlayan Portland çimentolu numunelerinden üç adet prizmatik numune üzerinde basınç dayanımı deneyi, elektriksel direnç, kılcal su emme, eğilme dayanımı deneyleri gerçekleştirilerek sonuçlar değerlendirilmiştir.



Şekil 3.9. Numunelerin suda ve laboratuvar ortamında kür edilmesi

Susuz (kükürtlü) beton numunelerin kür işlemleri oda sıcaklığında laboratuvarımızdaki kuru bir ortamda gerçekleştirilmiştir. Kükürt yapısı itibari ile 24 saat gibi kısa bir sürede priz alır ve bu süreyi uzatmak dayanımsal açıdan bir fark yaratmamaktadır. Gerekli kür süresini dolduran çimentolu numuneler ile kükürtlü beton numuneler aynı gün testlere tabii tutulmuştur.

### 3.5. Yapılan Deneyler

Bu bölümde üretilen kükürtlü ve kükürtsüz beton numunelerinin sertleşmiş haldeki özelliklerini belirlemek amacıyla bazı laboratuvar deneyleri yapılmıştır. Bu deneyler aşağıdaki bölümlerde incelenmiştir.

#### 3.5.1 Birim Ağırlık ve Ultrases Geçiş Hızı

Tez çalışmasının bu kısmında küp numuneler üzerinde fiziksel özellikleri belirlemek adına kullanılacak birim ağırlık ve ultrases geçiş süresi deneyleri yapılmıştır. İlk aşamada numunelerin ağırlıkları bulunmuş, bu değer hacme bölünerek birim ağırlık elde edilmiştir. Bu deneyde 70 mm'lik küp boyutlu numuneler kullanılmıştır. Numune boyutları kumpas

kullanılarak, TS EN 12390-7 (2010) standardına uygun olarak hassas bir şekilde ölçülmüştür. Numune değerleri ( $\Delta$ )  $\text{kg/dm}^3$  birimiyle hesaplanarak sonuçlar bölümünde belirtilmiştir. Birim ağırlık ve ultrases geçiş hızı deneyleri Şekil 3.10'da gösterilmiştir.



Şekil 3.10. Birim ağırlık ve ultrases geçiş hızı ölçümlerinin yapılması

Sertleşmiş betonda uygulanan ultrases geçiş hızı ölçümünde şekilde gösterilen yüksek frekanslı ASTM C597-16 (2016) standardına uygun cihaz kullanılmıştır. Cihazın kutupları numunenin her iki tarafından tutulur ve şekildeki gibi üç farklı ölçüm yapılarak ortalaması alınır.

### 3.5.2 Agregaların Birim Hacim Ağırlıklarının Bulunması

Bu deney kapsamında optimum agrega tayini yapılarak standart bir numune karışım oranları belirlenmiş ve oluşturulan tüm seriler bu oranlar baz alınarak yapılmıştır. Bu deneyin amacı yoğunluğu, dolayısıyla birim hacme düşen agrega miktarını arttırıp boşluk oranını azaltmak ve dayanımı olabildiğince yüksek tutmaktır.

Deney şu aşamalarla yapılmıştır. Farklı varyasyonlara ait aynı ağırlıktaki numuneler 24 saat su da bekletilip ardından etüvde kurutulmuştur. Böylece suya doymun yüzeyi kuru malzeme elde edilmiştir. Hazır olan malzeme ile aşağıda belirlenen formül yardımıyla agregaların özgül ağırlığı bulunmuştur (ASTM C-138, 2001).

$P_0 = \text{Kavanoz} + \text{Cam Plaka}$

$P_1 = \text{Kavanoz} + \text{Cam Plaka} + \text{Su}$

$P_2 = \text{Kavanoz} + \text{Cam Plaka} + \text{Agrega}$

$P_3 = \text{Kavanoz} + \text{Cam Plaka} + \text{Agrega} + \text{Su}$



Şekil 3.11. Birim hacim ağırlık deneyinin yapılması

- Deney için bir kavanoz ve üstünde hava kalmayacak şekilde kapatmak için kullandığımız bir cam plakanın ağırlıkları ( $P_0$ ) bulunur.
- İkinci olarak bu kavanozun iç hacmi ölçülür. Bunun için cam kavanoz içinde boşluk kalmayacak şekilde su ile doldurulur ve cam plaka ile kapanır. Suyun yoğunluğu 1 kabul ettiğimiz için suyun ağırlığı aynı zamanda kavanozun iç hacmi vermiş olur ( $P_1$ ).
- Sonraki aşamada ise agrega kuru olan kavanoza konulup agrega brüt ağırlığı ( $P_2$ ) bulunur.
- En son aşamada ise agrega konulmuş kavanoza boşluk kalmayacak şekilde su doldurulur. Toplam ağırlık ( $P_3$ ) tartılarak kaydedilir.

Aşağıdaki formül yardımı ile her varyasyon ayrı ayrı bu aşamalardan geçilip yoğunlukları karşılaştırılmış ve en yüksek yoğunluğa sahip karışım optimum agrega oranı olarak seçilmiştir. Birim ağırlık deneyinin yapılışı Şekil 3.11’de gösterilmiştir.

$$\text{Özgöl Ağırlık} = \frac{(P_2 - P_0)}{(P_1 - P_0) - (P_3 - P_2)} \quad (2)$$

### 3.5.3 Basınç ve Eğilme Dayanımları

TS EN 12390-3 (2010) standardı çerçevesinde, hazırlanan numunelerin basınç dayanımlarını ölçmek adına, 3000 kN kapasiteli hidrolik beton presi kullanılmıştır. Bütün numuneler sabit hızla yüklenmiş ve ilk çatlak oluşumuna kadar kuvvet etkisinde bırakılmıştır. Bulunan değerler yüzey alanına bölünerek MPa cinsinden basınç dayanım değerleri elde edilmiştir. Deneyin nasıl yapıldığı Şekil 3.12’de gösterilmiştir (TS EN 12390-3, 2010; ASTM C-293, 2016; TS EN 12504-1, 2019).



Şekil 3.12. Beton numunelerde basınç ve eğilme dayanım değerinin ölçümü

Eğilme dayanımları belirlenirken aynı özelliklere sahip 3 noktadan kuvvet uygulayabilen eğilme deneyi presi kullanılmıştır. Numuneler 28 gün boyunca su içerisinde küre tabii tutulmuş ve bu süre sonunda deneyler gerçekleştirilmiştir. Beton karışım oranları bölümünde belirtilen her bir seri için 3 numune üzerinde deneyler gerçekleştirilmiştir.

### 3.5.4 Elektriksel Özdirenç Deneyleri

Bu tez çalışması kapsamında geleneksel çimentolu ve kükürtlü beton numunelerinin dayanıklılık özelliklerinin belirlenmesi adına bazı deneyler yapılmıştır. Bunlardan ilki elektriksel özdirenç deneyidir. Susuz beton numunelerinin korozyona karşı direncinin ölçülebilmesi için betonun elektriksel iletkenliği hakkında bilgi sahibi olunmalıdır. Elektriksel özdirenci yüksek olan betonlarda korozyon reaksiyonları ya hiç oluşmamakta ya da çok düşük seviyede gerçekleşmektedir. Dolayısı ile mühendisler tarafından tercih edilen beton, düşük geçirimsiliğe sahip, yüksek elektriksel özdirenci olan beton

tasarımlarıdır. Bu çalışma kapsamında geleneksel beton ile susuz betonun korozyon olasılıklarının karşılaştırılması yapılmıştır.



Şekil 3.13. Numuneler üzerinde elektriksel özdirenç deneyinin uygulanması

Laboratuvarımızda bulunan ve pille çalışan elektriksel özdirenç ölçüm cihazı ile yapılan ölçümler yukarıdaki Şekil 3.13’de verilmiştir. Deneyler için 7 cm’lik küp boyutlarında numuneler hazırlanmıştır. Cihazın elektriksel özdirenç ölçümü yapan başlığının kutupları arası 5 cm’dir. Deneyin uygulanabilmesi için numuneler üzerlerini matkap yardımı ile 5 cm aralığında iki delik açılarak bu delikler reaktif bir jel ile doldurulmuştur. Cihazın başlığı bu deliklere geçirilerek okuma işlemi gerçekleştirilmiştir. Dikkat edilmesi gereken husus, bu işlemlerin yapılmadan önce numunelerin suya doygun hale getirilmesi gerektiridir.

Çizelge 3.7. Elektriksel direnç ile korozyon arasındaki ilişki

| Elektriksel Direnç ( $k\Omega.cm$ ) | Korozyon Olasılığı |
|-------------------------------------|--------------------|
| <5                                  | Çok Yüksek         |
| 5-10                                | Yüksek             |
| 10-20                               | Düşük              |
| >20                                 | Önemsiz            |

Deney gerçekleştirildikten sonra kaydedilen değerler, ASTM C 1876, (2019) standardı uyarınca yukarıda verilen Çizelge 3.7 ile karşılaştırılmış ve korozyon olasılığı hakkında bilgi sahibi olunmuştur. Cihaz birim değişikliğine gerek olmaksızın  $k\Omega.cm$  cinsinden değerleri görüntülemektedir.

### 3.5.5 Kılcal Su Emme Deneyi

Hazırlanan bir beton tasarımının geçirgenliği, korozyona etki eden zararlı bileşenlerin beton içerisine sızması bakımından çok önemlidir. Kılcal su emme deneyi birim zamanda beton içerisine sızan ve kapiler etki ile yükselen suyun miktarını belirleme prensibine dayanmaktadır. Bu miktar ne kadar yüksek olur ise beton numunenin kılcal geçirimsizliğinin o derece yüksek olduğu anlaşılır. Geçirimsizliği yüksek olan bir betonun dayanıklılığı düşük olacaktır. Deney sonunda, aşağıdaki formül yardımıyla bulunan değerler numunelerin kılcallık katsayılarıdır (TS EN 480-5, 2008).



Şekil 3.14. Kılcal su emme deney düzeneği

Kurutulan numuneler sadece taban kısmından su emmeleri için, yan tarafları parafin ile kaplanmıştır. Numunelerin tabanları 5 cm suya temas edecek resimde gösterildiği gibi yerleştirilmiştir. Numunelerin ağırlıkları belirli aralıklarla ölçülmüş ve emilen su miktarı hesaplanmıştır. Bu hesap aşağıda verilen formüle göre yapılmıştır. Bu formülde kılcallık katsayısı; numunenin su emdikten sonraki ağırlığı olan  $Q_n$ , numunenin ilk ağırlığı olan  $Q_0$  dan çıkartılarak, zamanın karekökü ve su emilen bölgenin yüzey alanının çarpımına oranıdır.

$$k = \frac{(Q_n - Q_0)/A}{\sqrt{t_n}} \quad (3.2)$$

Bu deney öncesinde numuneler 24 saat boyunca 100 °C' de ısıtılan etüvde kurutulmuştur. Belirtilen kür koşulları ve sürelerinde bekletilen her bir karışım için üç adet numune üzerinde deneyler gerçekleştirilmiştir.

#### 4. DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRİLMESİ

Beton içerisinde kükürt kullanımının beton özelliklerine ve yapısına etkilerinin deneysel olarak araştırıldığı bu çalışmada; betonlar üzerinde yapılan fiziksel, mekanik ve dayanıklılık deneylerinden elde edilen sonuçların değerlendirilmesi aşağıdaki bölümlerde verilmiştir. Her bir seri için gerekli hesaplamalar yapılmış ve bu sonuçlara ait grafikler çizilmiştir.

##### 4.1. Optimum Agrega Tayini

Önceki bölümlerde belirtildiği üzere en uygun karışım oranının belirlenmek istenmesindeki amaç, yüksek yoğunluklu karışım elde ederek beton hamuru içerisindeki her bir boşluğu doldurmaktır.

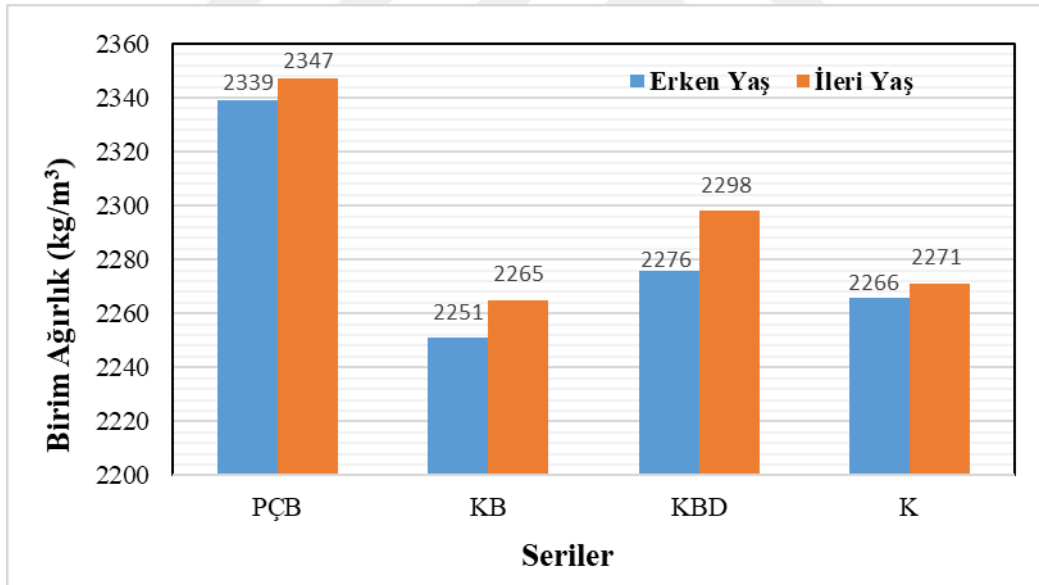
Çizelge 4.1. Optimum agregat tayini ile çeşitli oranların deneysel sonuçları

|             | Birim Hacim Ağırlık Tayini |        |             |              |                         |
|-------------|----------------------------|--------|-------------|--------------|-------------------------|
| Varyasyon 1 |                            | Kum    | 4mm agregat | 8 mm agregat | Yoğunluk                |
|             | Karışım Oranları           | 30%    | 30%         | 40%          | 1,582 g/cm <sup>3</sup> |
|             | Ağırlık                    | 150gr  | 150gr       | 200gr        |                         |
|             |                            |        |             |              |                         |
| Varyasyon 2 |                            | Kum    | 4mm agregat | 8 mm agregat | Yoğunluk                |
|             | Karışım Oranları           | 40%    | 30%         | 30%          | 1,593 g/cm <sup>3</sup> |
|             | Ağırlık                    | 200gr  | 150gr       | 150gr        |                         |
|             |                            |        |             |              |                         |
| Varyasyon 3 |                            | Kum    | 4mm agregat | 8 mm agregat | Yoğunluk                |
|             | Karışım Oranları           | 50%    | 20%         | 30%          | 1,593 g/cm <sup>3</sup> |
|             | Ağırlık                    | 250gr  | 100gr       | 150gr        |                         |
|             |                            |        |             |              |                         |
| Varyasyon 4 |                            | Kum    | 4mm agregat | 8 mm agregat | Yoğunluk                |
|             | Karışım Oranları           | 50%    | 30%         | 20%          | 1,604 g/cm <sup>3</sup> |
|             | Ağırlık                    | 250gr  | 150gr       | 100gr        |                         |
|             |                            |        |             |              |                         |
| Varyasyon 5 |                            | Kum    | 4mm agregat | 8 mm agregat | Yoğunluk                |
|             | Karışım Oranları           | 20%    | 30%         | 50%          | 1,582 g/cm <sup>3</sup> |
|             | Ağırlık                    | 100 gr | 150 gr      | 250 gr       |                         |
|             |                            |        |             |              |                         |
| Varyasyon 6 |                            | Kum    | 4mm agregat | 8 mm agregat | Yoğunluk                |
|             | Karışım Oranları           | 20%    | 50%         | 30%          | 1,582 g/cm <sup>3</sup> |
|             | Ağırlık                    | 100 gr | 250 gr      | 150 gr       |                         |

Sonuç olarak boşluk oranı yani porozitesi düşük olan beton karışımının mekanik ve dayanıklılık özelliklerinde artış elde edilecektir. Agregaların birim hacim ağırlıkları bulunduğundan sonra optimum agrega tayini ile en yüksek birim hacim ağırlıklı karışım, bu deney kapsamında kullanılacak olan standart karışım oranı olacaktır. Yukarıdaki Çizelge 4.1’de çeşitli varyasyonları deneyerek en yüksek yoğunluklu karışım seçilmiştir. Yapılan optimum agrega deneyi sonucunda, Varyasyon 4 olarak bilinen karışım oranları seçilmiştir.

#### 4.2. Birim Ağırlık Deney Sonuçları

Bu tez kapsamında dökümü yapılan kükürtlü ve Portland çimentolu betonlara ait birim ağırlık değerleri aşağıdaki grafikte ayrıntılı olarak verilmiştir. Birim ağırlıklar arasında kullanılan agrega oranı ve katkıya bağlı olarak bazı değişiklikler gözlenmiştir. Birim ağırlık sonuçları arasındaki farkların değerlendirilmesi bu kısımda yapılmıştır.



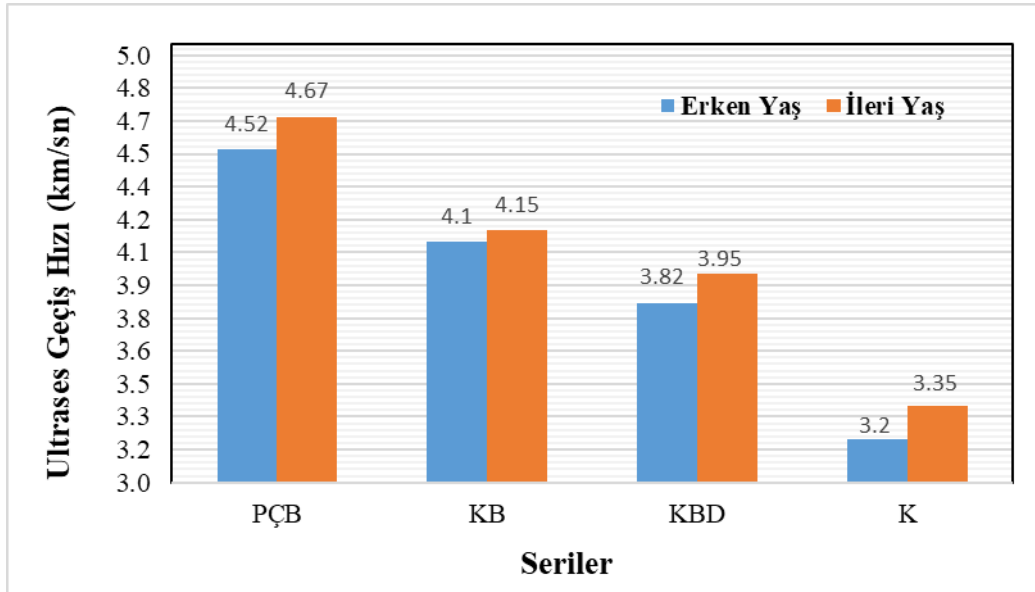
Şekil 4.1. Beton serilerine göre birim ağırlık değerlerinin değişimi

Yapılan deneyler sonucunda Portland çimentolu kontrol serilerinin birim ağırlıkları kükürtlü betonlara göre daha yüksek çıkmıştır. Karışımların aynı oranda ve cinsten agrega içermelerine karşın birim ağırlıklarındaki farkın temel sebebi çimentonun kükürde göre daha yoğun bir yapıya sahip olmasıdır. Özgül ağırlığı yüksek olan çimento belli bir hacimde daha yüksek ağırlıklı beton numuneler ortaya çıkmasına sebep olmuştur.

KBD serisinin, KB serisine göre daha yüksek birim ağırlığa sahip olmasının sebebi ise ikisinin de kükürtlü beton olmasına karşın KBD serisinde bulunan disiklopentadien'dir. Disiklopentadien yapısı gereği kükürt ile kompakt bir yapı oluşturur, homojen bir şekilde karışır ve yapısını bozmaz. Ayrıca karışıma katılmasının temel sebebi, kükürdün işlenebilirliğini arttırması ve ileri yaşlardaki dayanımını yükseltmesidir. Bundan dolayı KBD serisi numuneleri kalıba daha iyi yerleşmiş boşluk kalmamıştır. Tüm serilerde ileri yaş ve erken yaş değerleri göz önüne alındığında, numuneler ileri yaşda daha iyi priz reaksiyonlar gerçekleştirmiş ve birim ağırlıkları zaman geçtikçe bir miktar artmıştır (Şekil 4.1).

#### 4.3. Ultrases Geçiş Hızı Deney Sonuçları

Bu çalışmada dökümü yapılan kükürtlü ve Portland çimentolu betonlara ait bir diğer fiziksel özellik deneyi olan ultrases geçiş hızı deney sonuçları aşağıdaki grafikte ayrıntılı olarak verilmiştir. Ultrases geçiş hızı sonuçları değerlendirilirken, agregalar arasındaki boşluklar ve numunelerin kalıba tam yerleşmiş olması ultrases geçiş hızı değerlerinin belirlenmesinde etkili olmuştur (Şekil 4.2).



Şekil 4.2. Beton serilerine göre ultrases geçiş hızlarının değişimi

Bu deney kapsamında betonların boşluk oranı ve kompakt yapısı hakkında bilgi edinilmiştir. Ultrases geçiş hızı yüksek numunelerin iç yapılarının daha boşluksuz ve yoğun

olduğu fikrine bu deney sonucunda varılabilir. Kür süresi uzadıkça hidratasyon reaksiyonları daha iyi gerçekleşmekte ve ultrases geçiş süresi değerlerinde bir miktar artış gözlenmektedir.

Portland çimentosu ile yapılan kontrol numunelerinin ultrases değerleri daha düşükken, kükürtlü susuz beton numunelerinden çimentoya göre daha yüksek sonuçlar elde edilmiştir. Bunun sebebinin ergimiş kükürt karışımının agrega etrafını daha iyi sararak boşluk bırakmaması olarak görülmektedir. Dolayısı ile porozitesi daha düşük bir yapı ortaya çıkmış, buda ultrases geçiş hızlarında artışa sebep olmuştur. Disiklopentadien kullanılan numuneler (KBD) kullanılmayan numunelere göre (KB), disiklopentadien'in akışkanlaştırıcı özellik göstermesi sonucu kalıba iyi yerleşmiş ve yüksek ultrases değerlerine ulaşılmıştır.

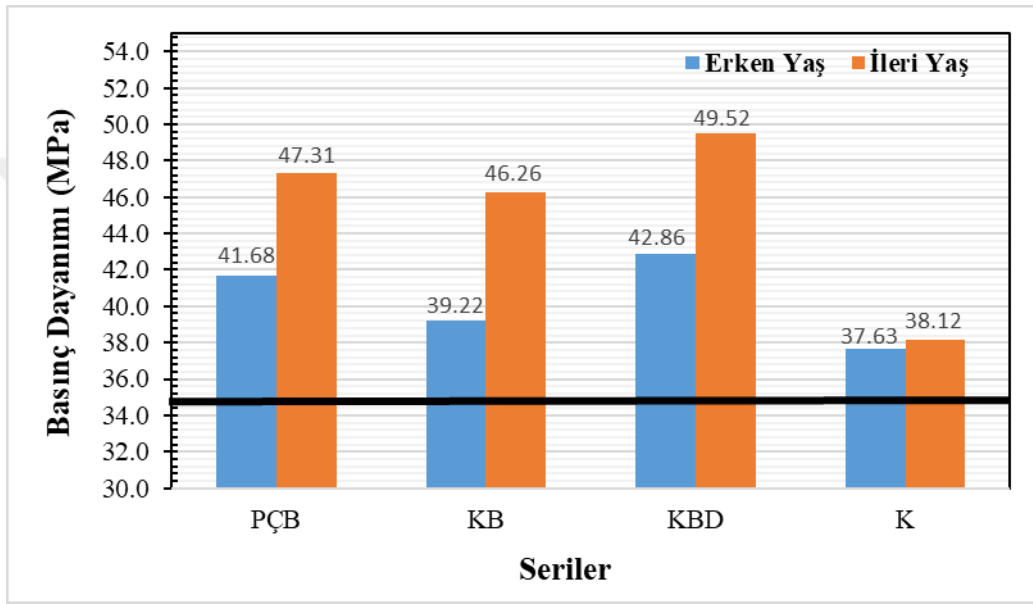
#### 4.4. Basınç Dayanımı Deney Sonuçları

Susuz beton ve geleneksel betonun karşılaştırıldığı bu deneysel çalışmada yapılan mekanik özellik deneylerinden biriside basınç dayanımı deneyidir. Bu deneye ait ayrıntılı resimler ve sonuçlar aşağıdaki bölümde verilmiştir. Basınç dayanımı deneyinde, kalibrasyonu yapılmış hidrolik laboratuvar presi kullanılmıştır. Basınç dayanım sonuçları bağlayıcı çeşidi ve kür süresi uzunluğuna bağlı olarak farklılık göstermiştir (Şekil 4.3).



Şekil 4.3. Agregalı ve agregasız susuz betonların kırılma şekilleri

Şekil 4.3-a ‘da agregası içermeyen kükürtlü betonun kırılmadan hemen önceki hali gösterilmiştir. Şekil 4.3-b ‘de saf kükürt içeren bu numunenin daha dikey eksenli kırılımlar yaptığı görülmektedir. Basınçtan kaynaklanan kuvveti taşıyacak agregası içermemesinden dolayı daha az kuvvette daha gevrek bir kırılma göstermiştir. Şekil 4.3-c ve Şekil 4.3-d’de ise agregası içeren kükürtlü beton karışımları gösterilmiştir. Bu betonlar geleneksel betona benzer şekilde daha üniform kırılmalar yapmıştır.



Şekil 4.4. Beton serilerine göre basınç dayanımlarının değişimi

Yukarıdaki Şekil 4.4.’de gösterildiği üzere agregalı kükürt içeren betonlar geleneksel betona yakın özellikler vermiştir. Kontrol betonunda 28. günde elde edilen basınç dayanımı, KB serisine çok yakındır. Basınç dayanımlarında en yüksek değer 49,52 MPa ile disiklopentadien içeren KBD serilerinde kaydedilmiştir. Susuz beton karışımlarında agregası ve katkı kullanmak basınç dayanımını önemli derecede arttırmıştır. Katkı kullanılan kükürtlü betonlar kullanılmayan kükürtlü betonlara göre daha yüksek değerler vermiştir. Bunun sebebi, disiklopentadien’in katılaşma ve sertleşmeye pozitif yönde yaptığı etkidir. Ayrıca bu katkı kükürdü daha homojen ve akışkan hale getirdiği için boşluk oluşmamış buda dayanıma olumlu yönde etkimiştir. Kür süresi uzadıkça basınç dayanımlarında artış görülmüştür.

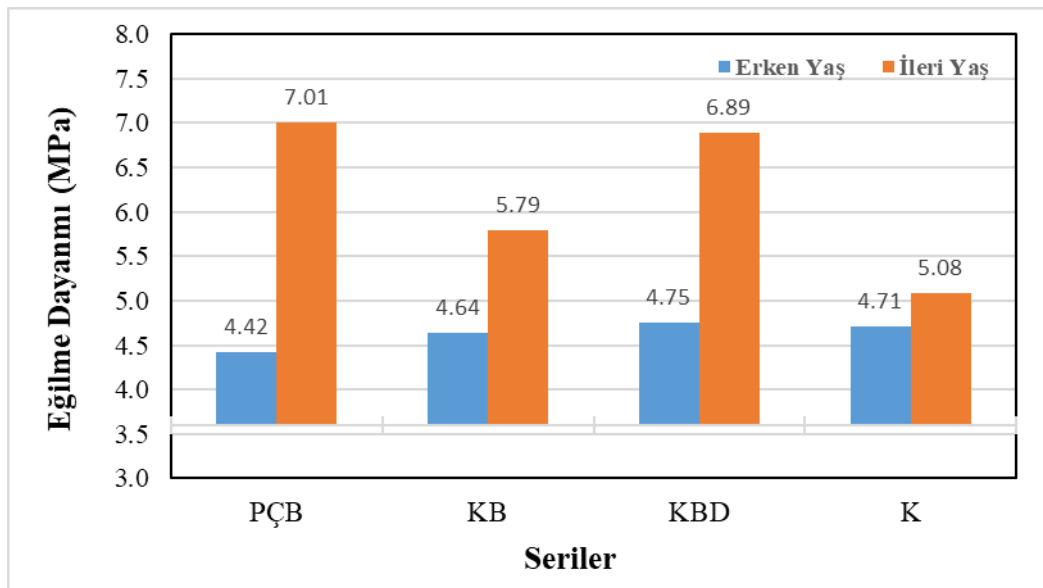
K serileri hiçbir katkı veya agregası içermeyen saf kükürt karışımlarıdır. Bu karışımların basınç dayanımları bütün seriler arasında en düşük sonuç alınanlardır. Agregası

içermeyen kükürt, dayanımsal açıdan istenileni verememiştir. Ayrıca K serisinde kür süresi dayanıma etki etmemiştir. Anlaşılmaktadır ki kükürdün içerisindeki agrega, kür süresi uzadıkça beton hamuru ile daha iyi bir aderans geliştirmiştir. Bunun yanında Tüm seriler depreme yönelik tasarım açısından 35 Mpa üstündedir.

#### 4.5. Eğilme Dayanımı Deney Sonuçları

Eğilme dayanımı betonarme elemanlar için önemli bir mekanik özelliktir. Eğilme dayanımının yüksek olması yapıya sünek özellik kazandırarak daha yüksek kuvvet altında hasar oluşturmada daha uzun süre dayanabilmesini sağlar. Bu çalışmada susuz beton numunelerinin eğilme dayanımları üç eksenli kuvvet uygulamak sureti ile ölçülmüştür. Eğilme dayanımları prizmatik kükürtlü ve geleneksel betonlar üzerinde yapılmıştır.

Şekil 4.5'te beton serilerine bağlı olarak eğilme dayanımlarındaki değişim gösterilmiştir. Normal koşullar altında basınç dayanımlarına göre betonun eğilme ve çekme dayanımları çok düşüktür. Susuz betonlarda geleneksel beton ile hemen hemen aynı eğilme özellikleri göstermiştir. Kür süresi arttıkça eğilme dayanımlarında artış görülmüştür. Bu artış erken yaş için bütün seriler için benzerdir. Fakat ileri yaşta hidratasyon reaksiyonlarının daha iyi gelişmesi ile Portland çimentolu betonun eğilme dayanımı önemli derecede artarken, kükürtlü betonlardaki artış geleneksel beton kadar olmamıştır.

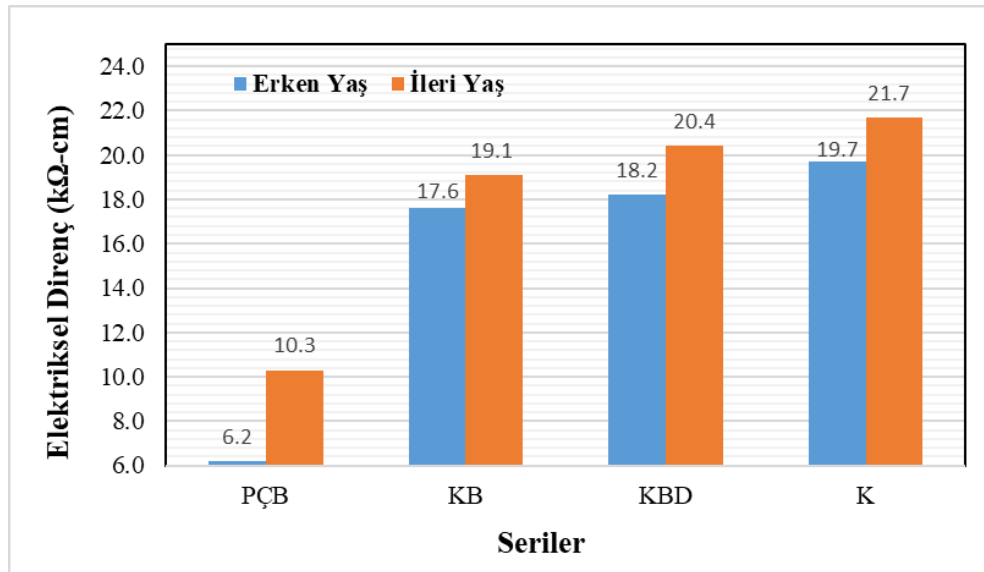


Şekil 4.5. Beton serilerine göre eğilme dayanımlarının değişimi

Burada en düşük eğilme dayanımını hiçbir katkı ve agrega içermeyen K serisi vermiştir. Bunun sebebi, kükürt ilk döküldüğünde daha yüksek kıvamlı esnektir. Kurumaya başladığında eğer içerisinde herhangi bir katkı yok ise suyunu kaybeder ve gevrekleşir. Gevrekliği artan kükürdün eğilmeye karşı göstermiş olduğu kuvvette düşer. KBD serisinde bulunan disiklopentadien, karışımı daha sünek hale getirerek KB serisine göre ileri yaşıta eğilme dayanımında önemli artış sağlamıştır. Sonuç olarak kükürtlü betonların eğilme dayanımları geleneksel betona göre bir miktar düşüktür fakat katkı kullanımı ile geleneksel betondan elde edilen eğilme dayanımı değerlerine ulaşılabilir.

#### 4.6. Elektriksel Direnç Deneyi Sonuçları

Kükürt ve kükürt ile üretilen betonlara bakıldığında fark edilen en önemli özelliklerin başında elektriksel iletkenlik gelmektedir. Kükürdün elektriksel iletkenliği yok denecek kadar azdır. Dolayısı ile kükürt ile üretilen betonlarda yüksek bir elektriksel direnç göstermektedir. Bu ölçümlerin sebebi ise yapısal kusurların başında gelen korozyonun, bir elektrokimyasal reaksiyonlar zinciri olduğu gerçeğidir. Düşük elektriksel iletim gösteren betonarme elemanların, korozyon olasılıkları da düşük olacaktır. Aşağıda verilen şekil 4.6’da beton serilerine göre elektriksel direnç değerlerini değişimi gösterilmiştir. Geleneksel Portland çimentolu betonun aksine kükürt içeren karışımların hepsinde yüksek bir elektriksel direnç gözlemlenmiştir. Agrega normalde iletken bir yapı malzemesi olmasına karşın, kükürdün elektriği iletmeişi sonuçların düşük çıkmasına sebep olmuştur.

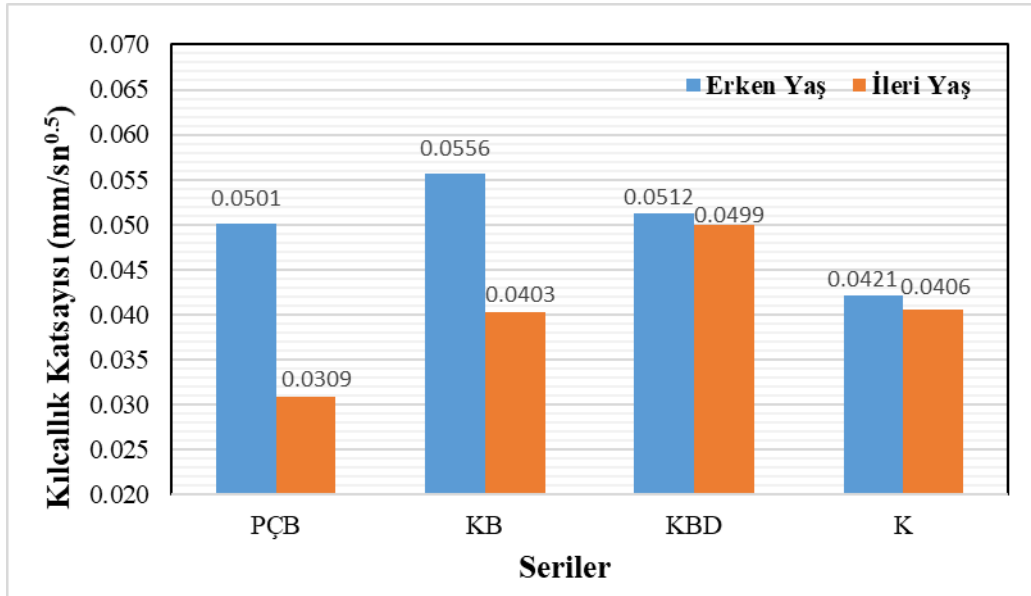


Şekil 4.6. Beton serilerine göre elektriksel direnç değerlerinin değişimi

Kür süresi arttıkça elektriksel direnç değerlerinde bir miktar artış olmuştur fakat bu değer geleneksel betonda daha fazla iken kükürt içeren KB, KBD ve K serilerinde daha azdır. Kükürt yapısı itibari ile kurudukça daha dirençli hale gelir. Numunelerin suya doymun hale getirilmesine rağmen elektriksel direnç değerlerinde düşüş yaşanmamıştır. Bu deneysel çalışmada en yüksek elektriksel direnç değerlerini agrega ve katkı içermeyen saf kükürt karışımları vermiştir. Buradan agreganın ve disiklopentadien'in, betonun elektriksel iletkenliğini arttırdığı sonucuna varılabilir.

#### 4.7. Kılcallık Katsayısı

Kılcallık katsayısı betonun birim zamanda bünyesine çektiği su miktarı olarak tanımlanabilir. Su beton içerisindeki kapilarite etkisiyle yerçekimine aksi yönde ilerleyebilir ve yapının üst kısımlarına kadar ulaşabilir. Bu emilen su miktarı betonun geçirimsizliğini belirlemek adına önemlidir. Geçirimli dolayısı ile boşluklu bir beton istenilen mekanik ve dayanıklılık özelliklerini veremez. Kılcal su emme deneyi sonucunda elde edilen katsayı olan kılcallık katsayısı, beton bileşimine ve kür süresine göre değişiklik göstermektedir. Bu değerlere ait grafik Şekil 4.7'de gösterilmiştir.



Şekil 4.7. Beton serilerine göre su emme değerlerinin değişimi

Farklı günlerde yapılan ölçümlerde emilen suyun miktarının zamanın kareköküne bölünmesi ile elde edilen sonuç bir grafik üzerinde işaretlenmiş, bu noktaların birleştirilmesi ile elde edilen eğrinin eğimi bize kılcallık katsayısını vermiştir. Bu katsayının düşük olması istenir, dolayısı ile beton hamuru daha az geçirgen ve dayanıklılığı daha yüksek olur.

Kılcallık katsayılarına bakıldığında, katkı içermeyen agregalı KB serisinin kılcallık katsayısı yani geçirimliliği, kontrol serisine göre daha yüksek çıkmıştır. Bunda agregaların oluşturduğu kapiler boşluklar etkilidir. Fakat katkı kullanılması ile KBD serisi kalıba daha iyi yerleşmiş ve kılcal boşlukların dolması ile betonun su emme değeri bir miktar düşürülmüştür. Agregası içermeyen ve saf kükürtten oluşan K serisinin beton hamuru tamamen boşluksuz bir kükürt eriyiğinden oluştuğu için su emme kapasitesi düşük çıkmış ve buda kılcal geçirimlilik katsayısının düşük çıkması ile sonuçlanmıştır. Kür süresinin kılcallık katsayısına etkisi sadece kontrol ve KB serisinde görülmüş, diğer serilerde zamana bağlı olarak su emme değerinde önemli bir değişiklik olmamıştır.

## 5. BULGULAR VE TARTIŞMA

Literatür taraması bölümünde birçok farklı araştırmacı tarafından farklı yıllarda yapılmış çalışmalara yer verilmiştir. Kükürtlü betonun yüksek dayanıklılık özelliklerinin yanı sıra ekonomikliğinin de irdelenmesi gerekir. Bu bölümde kükürtlü (susuz) betonla ilgili maliyet araştırmalarına yer verilmiştir. Literatürde bulunan susuz beton maliyeti ile bu tez kapsamında çıkarılan maliyetler karşılaştırılarak tartışılmıştır. Ayrıca bu bölümde, sonuçların daha iyi değerlendirilmesi ve alınacak sonuçlar ile daha tutarlı veriler elde etmek adına bir matematiksel modelleme yapılmıştır. Bu analizlerin amacı, fiziksel, mekanik ve dayanıklılık deneylerinin sonuçlarını birbiri ile karşılaştırarak, aralarındaki uyumlu ilişkiyi görebilmektir. Uygulanan matematiksel modellemede regresyon analizden faydalanılmıştır.

### 5.1. Kükürtlü Betonlar ile İlgili Maliyet Araştırması

Kükürtlü beton henüz gelişmekte olan ileri beton sınıflarından birisidir. Geleneksel Portland çimentolu beton gibi yaygın olmadığından dolayı maliyeti de henüz sektörde kullanılan piyasa fiyatlarını tam olarak yansıtamamaktadır. PÇB, bağlayıcı hammadde olarak çimentoyu esas almaktadır. Hem ülkemizde hem de dünya çapında hemen hemen her alanda çimento fabrikaları bulunmaktadır. Bu da seri üretimi imkanını arttırmakta ve maliyeti düşürmektedir. Kükürtlü betonda ise neredeyse sektörde hiç kullanılmamış olmasına rağmen petrol ve doğalgaz rafinerilerinden yan ürün olarak elde edilebilmektedir. Bilim insanları birçok madenin rezervinin tükenmesinden endişe duyarken kükürt elementinin tüketilmesinden endişe duymamaktadır. Dolayısı ile hammadde olarak kükürt elementi doğada tükense bile yan ürün olarak halihazırda çok miktarda elde edilebilmektedir

Kükürtlü betonun geleneksel Portland çimentolu betona göre en önde gelen özelliği olarak asitli ve zararlı iyonların bulunduğu ortamlardaki dayanıklılığıdır. Dolayısı ile aşağıda verilecek maliyet analizlerinde bu durum göz önünde bulundurulmalıdır. Bunun sebebi, deniz suyu ve sülfatlı ortamlarda geleneksel betonun dayanıklılığının düşük olması ve ek tedbirler dolayısı ile ek maliyetler gerektirmesidir. Fakat kükürtlü beton bu gibi ortamlarda güvenle kullanılabilir ve ek maliyet oluşturmaz. Aşağıda sadece geleneksel beton ile kükürtlü beton karşılaştırılmış, farklı ortam koşullarında kükürtlü beton çok daha ekonomik olabilmektedir. Türkiye’de Türkiye Hazır Beton Birliği beton sektörünü kontrol eden ve istatistik çalışmalarını yapan sektörde önemli bir kuruluştur. Türkiye Hazır Beton Birliği istatistiklerine göre 2020 yılında 95 milyon m<sup>3</sup> hazır beton üretilmiştir. Bir m<sup>3</sup> betonda ortalama 200 lt su kullanıldığı düşünülürse 19 milyon lt içilebilir temiz su tüketilmiştir.

Literatür araştırması bölümünde de belirtildiği gibi yapılan maliyet çalışmalarında fiyatlar birbirine yakın seyretmiştir. 1974 yılında Loov vd.’in yapmış olduğu çalışmada Kükürt 4.8\$ iken çimento 10.80\$ civarındadır. Kükürdün yaklaşık %60 daha ucuz olması maliyeti ucuzlatmıştır. 2016 yılında Tunç ve Demirtürk’ün yapmış olduğu maliyet çalışmasında kükürdü 89TL, çimento fiyatını ise 90TL olarak maliyet hesaplamıştır. Isıtma maliyeti hesaba katılmasına rağmen arasında 25TL fark ortaya çıkmıştır. Bu fark kükürdün

fiziksel ve mekanik özellikleri düşünülünce çok büyük bir fark olmadığı ortaya çıkar. Kükürdün dayanımı, asidik ortama karşı direnci göz önüne alınınca; PÇB'yi tercih edip kısa ömürlü olmasındansa kükürtlü beton tercih edip daha uzun süre kullanmak tercih edilebilir.

Çizelge 5.1. Kükürtlü ve çimentolu betonların maliyetlerinin karşılaştırılması

| Malzeme       | Maliyet (TL)                    |                          |
|---------------|---------------------------------|--------------------------|
|               | Modifiye Edilmiş Kükürtlü Beton | Portland Çimentolu Beton |
| Agrega        | 33                              | 28                       |
| Çimento       | -                               | 90                       |
| Kükürt        | 89                              | -                        |
| Isıtma        | 21                              | -                        |
| <b>Toplam</b> | <b>143 TL</b>                   | <b>118 TL</b>            |

Yapılan bir maliyet çalışması sonuçları Çizelge 5.1'de belirtilmiştir. Burada su çok yüksek bir maliyet oluşturmadığı için araştırmacılar tarafından hesaba dahil edilmemiştir. Agregamaliyetleri de hemen hemen eşittir (Tunç ve Demirtürk, 2016). Bu çalışmada kullanılan modifiye edilmiş kükürt, Türkiye'de bulunmadığı için ABD'den ithal edilmiş ve dolayısı ile toplam maliyetler karşılaştırıldığında susuz ya da kükürtlü beton geleneksel ya da Portland çimentolu betona göre her birim m<sup>3</sup> miktarda yaklaşık olarak %20 kadar daha pahalı üretildiği sonucuna varılmıştır. Normal kükürt kullanılmış olsa, maliyet araştırması daha farklı çıkabilirdi. Ayrıca daha önce belirttiğimiz gibi, karşılaştırmada susuz betonun geleneksel betona göre asidik veya tuzlu ortam koşullarına karşı sağladığı avantaj ise tamamen göz ardı edilmiş olup bu avantajın da maliyet karşılaştırmasına dâhil edilmesi gerekmektedir.

Çizelge 5.2. Susuz beton ve geleneksel betonların maliyet araştırması (Loov vd., 1974)

| Malzeme       | Maliyet (\$)   |                |
|---------------|----------------|----------------|
|               | Kükürtlü Beton | Normal Beton   |
| Agrega        | \$3.8          | \$3.7          |
| Çimento       | -              | \$10.50        |
| Kükürt        | \$4.8          | -              |
| Isıtma        | \$1.75         | -              |
| <b>Toplam</b> | <b>\$10.35</b> | <b>\$14.20</b> |

Loov vd. tarafından yurtdışında yapılan bir çalışmada, normal betona göre kükürtlü betonun %40 daha ekonomik olduğu açıklanmıştır (Çizelge 5.2). Bu çalışmada doğal kükürt kullanıldığı için susuz beton maliyet çok daha düşük çıkmıştır. Kükürtlü betonun geleneksel betona göre kullanımını cazip yapan avantajlarının yanı sıra taşıdığı bazı olumsuz yönleri de vardır. Bunların en başında, kükürtlü beton üretimi için gerek duyulan ısı miktarı gelmektedir. Kükürtlü betonun üretiminde kükürdün termo-plastik özelliğinden dolayı yüksek ısı kullanımına gereksinim vardır. Fakat tabloda da belirtildiği üzere bu ısı miktarının sağlanması sırasında oluşacak maliyet, diğer malzeme maliyetlerine göre çok düşüktür. Bu çalışma her ne kadar eski bir zamanda yapılmış olsa da toplam maliyet göz önüne alındığında, susuz betonun daha ekonomik olduğu anlaşılmaktadır.

Çizelge 5.3. Bu tez çalışmasında yapılan geleneksel betonların maliyet araştırması

| No            | Malzeme      | Kullanılacak Miktar | Birim Fiyatı | Toplam (TL)      | Toplam (\$)     |
|---------------|--------------|---------------------|--------------|------------------|-----------------|
| 1             | Çimento      | 350 kg              | 1,2 TL/Kg    | 420 TL           | 49,52 \$        |
| 2             | Kum          | 825 kg              | 50 TL/Ton    | 41,25 TL         | 4,86 \$         |
| 3             | İri Agregat  | 375 kg              | 60 TL/Ton    | 22,5 TL          | 2,65 \$         |
| 4             | İnce Agregat | 655 kg              | 65 TL/Ton    | 42,58 TL         | 5,02 \$         |
| 5             | Su           | 175 kg              | 9,05 TL/Ton  | 1,58 TL          | 0,18 \$         |
| <b>TOPLAM</b> |              |                     |              | <b>527,91 TL</b> | <b>62,23 \$</b> |

Çizelge 5.4. Bu tez çalışmasında yapılan susuz betonların maliyet araştırması

| No            | Malzeme      | Kullanılacak Miktar | Birim Fiyatı | Toplam (TL)      | Toplam (\$)     |
|---------------|--------------|---------------------|--------------|------------------|-----------------|
| 1             | Kükürt       | 350 kg              | 1,05 TL/Kg   | 367,5 TL         | 43,33 \$        |
| 2             | Kum          | 825 kg              | 50 TL/Ton    | 41,25 TL         | 4,86 \$         |
| 3             | İri Agregat  | 325 kg              | 60 TL/Ton    | 19,5 TL          | 2,29 \$         |
| 4             | İnce Agregat | 655 kg              | 65 TL/Ton    | 42,58 TL         | 5,02 \$         |
| 5             | Su           | 50 kWh              | 0,27 TL/kWh  | 13,5 TL          | 1,60 \$         |
| <b>TOPLAM</b> |              |                     |              | <b>484,33 TL</b> | <b>57,11 \$</b> |

2021 yılının 3. çeyreğinde yapmış olduğum maliyet araştırmasında ise aşağıdaki sonuçlar ortaya çıkmıştır. Bu maliyet araştırmasında 1m<sup>3</sup> beton olarak kükürtlü beton ile C35 dayanımına sahip Portland çimento betonunun tasarım maliyeti hesapları karşılaştırılmıştır. Çizelge 5.3 ve 5.4.'de görüldüğü üzere geleneksel beton ile kükürtlü beton arasında 43,58 TL fark bulunmaktadır. Bu fiyatlar 2021 yılına ait olup firmadan firmaya, bölgeden bölgeye fark etmektedir. Ayrıca global enflasyon oranları da geçmiş zamanda bulunan fiyat farklarını değiştirmiştir. Bu fiyatlar 2021 yılının eylül ayında 8,48\$/TL olarak

hesaplanmıştır. Bu çalışmanın yapıldığı tarih itibari ile kükürtlü betonun belli bir miktar daha ucuz olduğu anlaşılmaktadır. Zaman içerisinde artan kükürt rezervleri ve istifleme sorunları ile birlikte kükürt fiyatlarının ucuzlaması, çimento kullanımının azalması ve kükürtlü beton maliyetlerinin daha da düşeceği öngörülmektedir.

Bu maliyet analizine dahil edilmesi gereken bir diğer husus ise, kullanım alanı daha geniş olan kükürtlü betonun, özel beton tasarımı gerektiren durumlarda Portland çimento betonuna göre daha ekonomik hale gelmesidir. Örneğin agresif ortamlarda, geleneksel beton ek önlemler gerektirir ve bu da beton döküm maliyetini artırır. Susuz beton bu tür ortamlarda ek maliyet gerektirmez. Bu maliyet analizi normal durumlar için hesaplanmıştır. Ortam koşullarının değiştiği durumlarda kükürtlü beton daha ekonomik hale gelebilmektedir.

## 5.2. Kükürtlü Betonların Avantaj ve Dezavantajları

Kükürt bağlayıcılı betonların imalatı sırasında karşılaşılabilecek problemler dışında imalatı tamamlanmış olan yapıların içinde bulundukları çevre ve canlı yaşamı üzerindeki etkilerinin de göz önüne alınması gerekmektedir. PCB kullanılarak hazırlanan ve toprakla temas yüzeylerine sahip temellerin ve beton blokların oturdukları zemin üzerinde yapılan araştırmalarda temas edilen toprağın pH seviyesinde artış meydana geldiği belirlenmiştir. Eğer kükürt bağlayıcılı betonlardan kükürt ayrışması meydana gelirse PCB'lerin etkisinin tersine etki ederek temasta oldukları toprağın pH seviyesinin düşmesine neden olacaklardır. Dolayısı ile zeminin asitlik derecesinde artacaktır. Buna karşılık olarak PCB'ler zehirsiz olarak sınıflandırılırlar dahi tıpkı kükürt buharı ile taşınmakta olan kükürt partiküllerinin etkisi gibi çimento tozunun da insan sağlığı üzerinde olumsuz etkisi bulunmaktadır.

Kükürt bağlayıcılı betonlar için en büyük risk, maruz kaldıkları ortam sıcaklığının 120 °C'nin üzerinde çıkmasıdır. Bu sıcaklık seviyelerinde beton dayanımını kaybetmekte ve bu sıcaklığın üzerindeki sıcaklıklarda kükürdün erime noktasının geçilmesi ile bağlayıcı faz erimekte ve beton bütünlüğünü kaybetmektedir. Dayanım özellikleri açısından risk teşkil etse de kükürt bağlayıcılı betonların kontrollü olarak eritilmesi ile geri dönüşüm imkânı sağlanabilmektedir. Ancak alevli yanma ve tutuşma açısından kükürt betonlar hem saldıkları

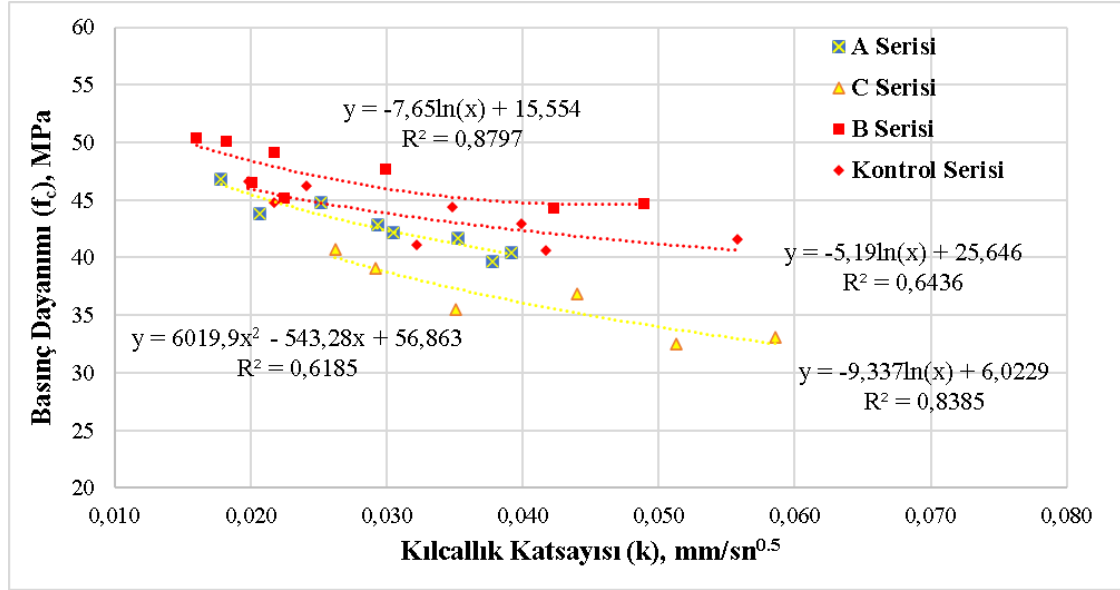
zehirli gazlar açısından hem de içten yanmaya devam etme özelliği nedeniyle tehlike arz etmektedir. Bu nedenle kükürt beton uygulamalarında, yapının maruz kalacağı etkiler bu riskler ışığında değerlendirilmelidir. İnşaat endüstrisi sera gazının en önemli kaynaklarından bir tanesi olarak gösterilmektedir. Betondaki çimento en çok kullanılan yapı malzemesidir ve insan kökenli CO<sub>2</sub> emisyonlarının %5'inden fazlasını meydana getirmektedir.

Portland çimentosu üretiminde ton başına yaklaşık olarak 0,85 ton CO<sub>2</sub> açığa çıkmaktadır. Bağlayıcı olarak kükürt kullanılması ve kükürdün petrol işlemesi sırasında açığa çıkan bir ürün olarak değerlendirilecek olması nedeniyle Portland çimentosu yerine kullanılarak üretimin azalmasını ve CO<sub>2</sub> emisyonu miktarının düşmesini sağlayacaktır. Kükürt bağlayıcılı betonların dökümleri sırasında alınması gereken önlemler sıcak döküm olması sebebiyle geleneksel asfalt betonlarının dökümlerinde alınan güvenlik önlemleri ile benzerlik göstermektedir. İşçi sağlığı açısından öncelikle imalat sırasında açığa çıkan gazların tehlikeli konsantrasyonun altında kaldığı bilinse dahi karışımın doğrudan solunması önlenmelidir. Bu nedenle özel filtreli tam yüz gaz maskeleri tercih edilmelidir. Tam yüz gaz maskesi, hem döküm sırasında solunabilecek zehirli kükürt buharını hem de karışımdan sıçrama ihtimali olan sıvı kükürdün yüzde oluşturabileceği yanıklara karşı koruyacaktır.

### 5.3. Regresyon Analizleri ile Sonuçların Tartışılması

Regresyon analizi, iki ya da daha çok nicel değişken arasındaki ilişkiyi ölçmek için kullanılan analiz yöntemidir. Analiz sonucunda oluşturulan grafiklerin üzerlerinde, eğri denklemleri verilmiştir. Bu denklemler vasıtası ile, herhangi bir değişken değeri için bütün ara değerler belirli bir yanılma payı ile tahmin edilebilir.  $R^2$  ifadesi sıfıra yakınsa (ki 0 ile 1 arasında bir değer alır) uyumun iyi olmadığı ve modelin değiştirilmesi gerektiği sonucuna varılır. Eğer 1'e yakın ise değişkenler arasındaki uyumun iyi olduğu ve matematiksel modelin yüksek olasılıkla doğru sonucu vereceği anlaşılar. Bu tez çalışmasında regresyon analizleri birbirleri ile ilişki kurulabilecek deney olan, basınç dayanımı – kılcal su emme arasında kurulmuştur. Bu deneyler arasında bulunabilecek doğru veya ters orantı bize betonun fiziksel, mekanik ve dayanıklılık özelliklerinin kendi aralarındaki ilişkiyi verecektir.

Basınç dayanımı ile kılcallık katsayısı arasındaki ilişki aşağıdaki Şekil 5.1’de verilmiştir. Numune sonuçlarının oluşturduğu küme içerisinde çizilen eğilim çizgisi, belirli sayıda sonuç baz alınarak aşağıdaki gibi çizilmiştir. Bütün numunelerin regresyon analizine dahil edilmesi çizgi denklemini çok fazla değiştirmeyeceği için, eğilim çizgisi gerekli sayıda nicel değişken kullanılması yeterlidir.



Şekil 5.1. Basınç dayanımı ile kılcallık katsayısı arasındaki ilişki

Kontrol

$$f_c = -5,19\ln(x) + 25,646 \quad (R^2 = 0,6436) \quad (5.1)$$

KB Serisi

$$f_c = 6019,9x^2 - 543,28x + 56,863 \quad (R^2 = 0,6185) \quad (5.2)$$

KBD Serisi

$$f_c = -7,65\ln(x) + 15,564 \quad (R^2 = 0,8797) \quad (5.3)$$

K Serisi

$$f_c = -9,337\ln(x) + 6,0229 \quad (R^2 = 0,8385) \quad (5.4)$$

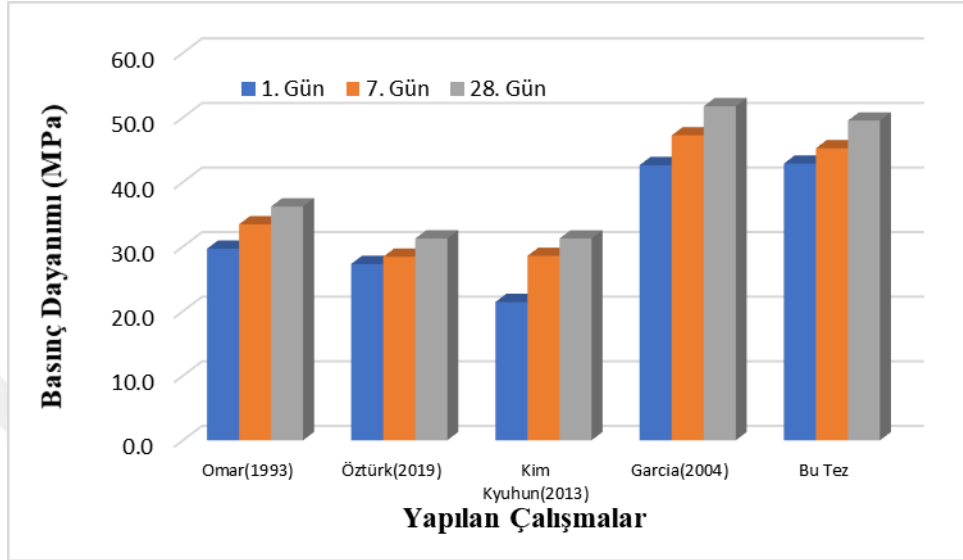
Şekilde kılcallık katsayılarının azalması ile basınç dayanımı değerlerinin arttığı görülmüştür. Kılcallık katsayıları düşük olan betonlar daha geçirimsiz ve boşluksuz olduğundan dolayı bu betonlardan elde edilen basınç dayanımı değerleri daha yüksek olarak elde edilmiştir. Kontrol serilerinden şekil üzerinde gösterilen logaritmik ilişki elde edilirken, KB serilerinden polinomsal bir ilişki elde edilmiştir ve  $R^2$  değeri kabul edilebilir düzeydedir. KBD ve K serilerden  $R^2$  değerleri oldukça yüksek olan logaritmik matematiksel modeller elde edilmiştir. Buradan çıkarılacak sonuç, katkı içeren KBD serilerinde ve saf kükürt içeren K serilerinde basınç dayanımı ile kılcal su emme değerleri arasında kuvvetli bir ilişki vardır. Eğilim çizgilerinin yönüne baktığımızda, bu iki değişken arasında ters bir oran görülür yani biri arttıkça diğeri azalır. Kılcallık katsayısı artan betonlarda basınç dayanımı da düşmüştür.

Bu çalışmada, doğal veya yapay yollardan elde edilen kükürdün geleneksel Portland çimentosu yerine beton içerisinde kullanılmasının uygunluğu ve kullanılması durumunda normal bir inşaat beton örneğine göre mekanik ve dayanıklılık özellikleri açısından avantaj ve dezavantajlarının incelenmesi amaçlanmıştır. Literatürde yer alan tüm çalışmalar göz önüne alındığında saf kükürt kullanılarak hazırlanan susuz betonlara ait araştırmaların sayısının oldukça yetersiz olduğu görülmüştür. Bu regresyon analizleri (modeller) yardımıyla beton özelliklerinin birbirleri ile olan ilişkisi ortaya konularak gerekli çıkarımlar yapılmıştır.

#### 5.4. Sonuçların Yapılan Diğer Çalışmalar ile Karşılaştırılması

Tez çalışmasının önceki bölümlerinde yapılan literatür çalışmalarından bahsedilmiştir. Son yıllarda kükürtlü beton ile ilgili yapılan yapılar, kükürtlü betonun kullanım alanları, diğer araştırmacıların bulduğu sonuçlar ve uyguladıkları yöntemler verilmiştir. Bu bölümde ise diğer araştırmacılar ile bu çalışmada yapılan deney sonuçları karşılaştırılmıştır. Deney sonuçları arasında bir kıyas yapılabilmesi için seçilen çalışmaların aynı karışım ve yöntemleri kullanmış olması gerekir. Literatür araştırması yapılırken bu konuya özen gösterilmiştir. Aşağıda geçmişte kükürt ile yapılmış çalışmalardan derlenmiş sonuçlar, basınç dayanımı ve eğilme dayanımı adı altında ortak olarak gösterilmiş bu çalışma

sonuçları ile birlikte gösterilmiştir. Genel itibari ile bakıldığında bu tez çalışmasında alınan sonuçların diğer çalışmalardan iyi olduğu ve yöntemlerin düzgün uygulandığı anlaşılmıştır.



Şekil 5.2. Basınç dayanımı sonuçlarının karşılaştırılması

Kükürtlü beton çalışmalarından bir diğeri de 1993 yılında Omar tarafından gerçekleştirilmiştir. Farklı oranlarda kükürt ile ay toprağı (regolit) benzeri malzemenin 150 °C’de karıştırılıp eritilmesi ile gerçekleştirilmiştir. Eritilen sülfürlü beton 50,8 mm boyutlarında metal küplere dökülmüştür. Çekiçle vurularak sıkıştırılmıştır. Omar bu çalışmada kükürt karışımına lif eklemiş kükürtlü, daha yüksek eğilme dayanımları elde edebilmiştir. Dayanım sonuçlarında %35 kükürt oranlı kükürtlü betonda en yüksek dayanımın 33.8 MPa olduğu görülmektedir. Karışıma eklenen lifler çekme dayanımlarına da olumlu etki yapmış, %35 kükürt oranlı beton daha iyi sonuç vermiştir (Omar, 1993).

Omar (1993) yazdığı makalede, özellikle Ay betonu için bir bağlayıcı olarak erimiş kükürdün kullanılmasıyla ilgili mekanik davranışların sonuçlarını incelemiştir. Belirli bir dayanım üretmek için gereken kükürt miktarını incelemek için ağırlıkça kükürdü ay toprağına benzer oranda kullanmıştır. Makalede ayrıca, özel olarak tasarlanmış bir vakum odasında kükürdün eritildiği ve ay regoliti ile karıştırıldığı deneylerde açıklanmıştır. Üretilen betonun özellikleri, normal basınç altında üretilen betonunkilerle karşılaştırılmıştır. Bu karışımların basınç, çekme ve eğilme dayanımları değerlendirilmiştir. Basınç, çekme ve eğilme dayanımları üzerindeki etkilerini incelemek için bazı karışımlara metal ve cam elyafı

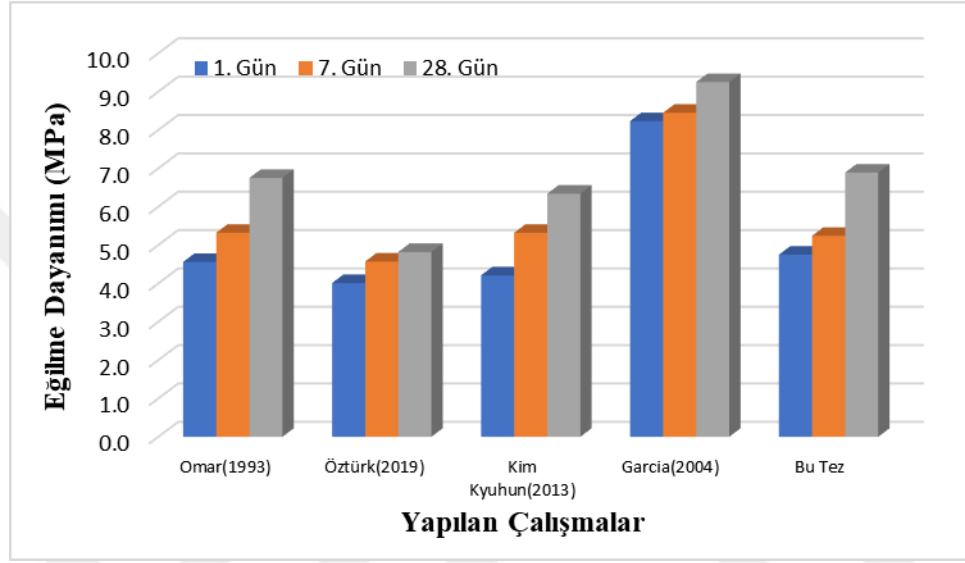
lifleri eklenmiştir. Bu lifler numunelerin eğilme dayanımlarını arttırmış fakat basınç dayanımlarına olumlu bir etki yapmamıştır. Bulunan sonuçlar, bu tez çalışması ile karşılaştırıldığında aralarında paralellik görülmektedir. Bu çalışmada lifler kullanılmamasına rağmen, kullanılan katkılar dayanım sonuçlarına olumlu etki yapmıştır.

Öztürk (2019) yaptığı çalışmada, petrol endüstrisinden elde edilen kükürt kullanılarak hazırlanan kükürt (KB) ve kükürt polimer betonların (KPB) mekanik ve dayanıklılık özelliklerinin incelenmiştir. Deneysel çalışmalar; kükürt modifikasyonunun, karışım oranlarının, mekanik özelliklerin ve dayanıklılık özelliklerinin belirlenmesini amaçlayan dört adımdan oluşmaktadır. İlk olarak kükürdün, petrol endüstrisinden temin edilen bitüm kullanılarak modifiye edilmesi amaçlanmıştır. Saf kükürt içerisine ağırlıkça %2,5, %5 ve %7,5 oranlarında bitüm ilave edilerek içyapıdaki değişim polarize optik mikroskop (POM), diferansiyel taramalı kalorimetri (DSC) ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) deneyleri kullanarak incelenmiştir. Saf kükürdün modifikasyonu için gerekli bitüm oranının %2,5 olduğu bulunmuştur. KPB'ler için en uygun karışım oranları mekanik özellikleride göz önünde bulundurularak saf kükürt: modifiye kükürt: uçucu kül: doğal kum: kırma taş ağırlıkça oranları sırasıyla %33,95; %1,05; %35; %15; %15 olarak belirlemiştir.

Deneylerden elde edilen değerler Portland çimento beton (PÇB) numunelerinden elde edilen değerler ile karşılaştırmıştır. Deney sonuçları incelendiğinde KB ve KPB'lerin erken dayanımlarının daha yüksek ve priz sürelerinin daha kısa olduğu görülmüştür. KPB ve KB'lerin PÇB'lere göre daha az böhme aşınma kaybı gösterdiği belirlenirken KPB'lerin KB ve PÇB'lere göre daha düşük su geçirimsizliği ve donma-çözülme etkisine karşı önemli ölçüde yüksek direnç gösterdiği belirlenmiştir. Öztürk (2019)'un çalışması ile bu tez kapsamındaki basınç ve eğilme deneyi sonuçlarının paralellik gösterdiği gözlemlenmiştir. Öztürk çalışmasında belirli oranlarda uçucu kül kullanmasına rağmen, bu tez çalışmasında kullanılan DCPD ile daha yüksek basınç dayanımları elde edilmiştir. Eğilme dayanımı sonuçlarında 28. numuneleri karşılaştırıldığında daha yüksek dayanım sonuçları elde edilmiştir.

Kyuhun (2013) yaptığı bir çalışmada, Portland çimentosu yerine modifiye kükürt bağlayıcı ile yapılan kükürt betonunun mekanik ve dayanıklılık özelliklerini araştırmıştır.

İşlenebilirliği koruyarak kükürt miktarını en aza indirmek için çeşitli optimal karışım oranlarını bulmak için farklı tip ve boyutlarda agrega ve çeşitli oranlarda uçucu kül ve kükürt ile 7 numune örneği test etmiştir. Basınç ve eğilme dayanımı testleri yapılmış ve kükürt betonun elastik modülü ölçülmüştür. En fazla 19 mm, 13 mm ve 25 mm iri agrega boyutu ile yapılan numuneler için ortalama basınç dayanımı sırasıyla 28,5 ve 30,6 MPa'dır.



Şekil 5.3. Eğilme dayanımı sonuçlarının karşılaştırılması

Uçucu kül oranı kükürt yerine 5, 12 ve %15'e yükseltildiğinde, kükürtlü betonun basınç dayanımı sırasıyla 35, 32 ve 41 MPa göstermiştir. Bu nedenle, 19 mm iri agrega ve (ağırlıkça) %15 uçucu kül içeren durum en iyi mekanik özellikleri göstermiştir. Ön testlerin sonuçlarına dayanarak, donma ve çözülme direnci, termal genleşme katsayısı ve kimyasal direnç gibi şiddetli ortamlarda kükürt betonunun özelliklerini araştırmak için üç tip numune test edilmiştir. Kükürt betonlarının ölçülen termal genleşme katsayılarının ortalaması  $15.26 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 'dir. Bu değer, Portland çimento betonundan (10.0~13.0) daha büyüktür. Kükürtlü betonlar, kontrol numunesine göre donma ve çözölmeye karşı yüksek direnç göstermiştir.

Kyuhun (2013) yaptığı çalışma ile bu çalışmanın ortak yönleri karşılaştırıldığında, Kyuhun, modifiye edilmiş kükürt kullanmasına rağmen, bu tez çalışmasında daha yüksek basınç dayanımları elde edilmiştir. Bunda kullanılan DCPD katkısının etkisi büyüktür. Eğilme dayanımları karşılaştırıldığında ise hemen hemen paralel sonuçlar elde edilmiştir.

Garcia (2004), mükemmel mekanik özelliklere ve düşük çevresel etkiye sahip modifiye edilmemiş saf kükürt harçları ve betonları geliştirilmiştir. Modifiye edilmemiş kükürt betonunun kullanımı göz ardı edilemez olduğunu, kükürt olmasına rağmen yüksek seviyeli teknolojinin mevcut olmadığı alanlarda iyi bir inşaat çözümünü veya alternatifini temsil edebileceğini söylemiştir. Kükürt betonun bir inşaat malzemesi olarak yüksek bir potansiyel sunduğu ve aynı zamanda inşaat ve endüstriyel sektörlerin sürdürülebilir gelişimine katkıda bulunduğu çeşitli uygulamalar önermiştir. Yaptığı çalışmada, kükürt betonları için basınç dayanımları 50 ila 60 MPa civarında ve eğilme dayanımları 8-10 MPa civarında bulmuştur. Bu dayanım miktarlarına sadece birkaç saat sonra ulaşıldığını özellikle belirtmiştir.

Garcia (2004)'ün yaptığı çalışmada da bu çalışmada olduğu gibi saf kükürt kullanılmıştır. Yaptığı çalışmada basınç dayanımları bu çalışma ile benzer bulunmasına rağmen eğilme dayanımları daha yüksek çıkmıştır. Bunda dökülen numunelerin boyutları önemli etkisi vardır. Bu tez kapsamında daha büyük boyutta numuneler kullanıldığı için üç eksenli eğilme dayanımı testinde değerler daha düşük çıkmıştır. Daha küçük numunelerde 'L' boyu kısaldığı için eğilme dayanım daha yüksek çıkması ön görülmektedir. Aynı boyutta numune kullanılan kükürtlü beton çalışmalarında sonuçlar benzerlik göstermektedir.

## 6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada petrol rafinerilerinden yan ürün olarak elde edilen saf kükürt ile agrega ve çeşitli katkıları karıştırılarak oluşturulan kükürtlü betonun (KB) fiziksel ve mekanik özelliklerine etkileri ve normal Portland Çimentolu Beton (PÇB) ile karşılaştırılması yapılmıştır. Bu çalışmadaki kükürtlü karışımlarda hiç su kullanılmayarak, susuz beton üretimi yapılmıştır. Farklı oranlarda kaba ve ince agregalar ile 6 farklı seri oluşturularak optimum agrega tayini yapılmış ve optimum karışım oranı belirlenmiştir. Optimum kaba-ince agrega karışımı belirlendikten sonra 4 farklı beton serisi yardımıyla geleneksel ve kükürtlü beton arasındaki özellikler belirlenmiştir. Farklı boyutlardaki beton numuneler üzerinde yapılan fiziksel, mekanik ve dayanıklılık deneyleri yapılmış, ayrıca iki farklı kür süresi uygulanmıştır. 100 adet beton numune üzerinde yapılan bu tez çalışması ile elde edilen sonuçlar ve deney sonuçlarının birbirleri arasındaki ilişkileri maddeler halinde verilmiştir.

- Yapılan optimum agrega deneyi sonucunda, Varyasyon 4 olarak bilinen karışım oranları seçilmiştir. Bu oran bütün serilerde uygulanmış ve en yüksek birim hacim ağırlık değeri elde edilmiştir. Beton karışım oranlarında %50 kum %30 kaba agrega ve %20 ince agrega seçilmesinin sonucunda en yoğun (birim ağırlıkta) beton karışımı elde edilmiştir.

- Yapılan deneyler sonucunda Portland çimentolu kontrol serilerinin birim ağırlıkları kükürtlü betonlara göre daha yüksek çıkmıştır. Özgül ağırlığı yüksek olan çimento belli bir hacimde daha yüksek ağırlıklı beton numuneler ortaya çıkmasına sebep olmuştur. KBD serisinin, KB serisine göre daha yüksek birim ağırlığa sahip olmasının sebebi ise ikisinin de kükürtlü beton olmasına karşın KBD serisinde bulunan disiklopentadien'dir. Disiklopentadien yapısı gereği kükürt ile kompakt bir yapı oluşturur, homojen bir şekilde karışır ve yapısını bozmaz. Ayrıca karışıma katılmasının temel sebebi, kükürdün işlenebilirliğini arttırması ve ileri yaşlardaki dayanımını yükseltmesidir. Bundan dolayı KBD serisi numuneleri kalıba daha iyi yerleşmiş boşluk kalmamıştır. Tüm serilerde ileri yaş ve erken yaş değerleri göz önüne alındığında, numuneler daha iyi priz reaksiyonları gerçekleştirmiş ve birim ağırlık artmıştır.

- Portland çimentosu ile yapılan kontrol numunelerinin ultrases değerleri daha düşükken, kükürtlü susuz beton numunelerinden çimentoya göre daha yüksek sonuçlar elde edilmiştir. Bunun sebebinin ergimiş kükürt karışımının agrega etrafını daha iyi sararak boşluk bırakmaması olarak görülmektedir. Dolayısı ile porozitesi daha düşük bir yapı ortaya çıkmış buda ultrases geçiş hızlarında artışa sebep olmuştur. Disiklopentadien kullanılan numuneler (KBD) kullanılmayan kükürtlü numunelere göre (KB), disiklopentadien'in akışkanlaştırıcı özellik göstermesi sonucu daha yüksek ultrases değerlerine ulaşılmıştır.

- Kontrol betonunda 28. günde elde edilen basınç dayanımı, KB serisine çok yakındır. Basınç dayanımlarında en yüksek değer 49,52 MPa ile disiklopentadien içeren KBD serilerinde kaydedilmiştir. Susuz beton karışımlarında agrega ve katkı kullanmak basınç dayanımını önemli derecede arttırmıştır. Bunun sebebi, disiklopentadien'in katılaşma ve sertleşmeye pozitif yönde yaptığı etkidir. Ayrıca bu katkı kükürdü daha homojen ve akışkan hale getirdiği için boşluk oluşmamış buda dayanıma olumlu yönde etkimiştir. Kür süresi uzadıkça genel olarak basınç dayanımlarında artış görülmüştür. K serileri hiçbir katkı veya agrega içermeyen saf kükürt karışımlarıdır. Bu karışımların basınç dayanımları bütün seriler arasında en düşük sonuç alınanlardır. Agrega içermeyen kükürt, dayanımsal açıdan istenileni verememiştir. Ayrıca K serisinde kür süresi dayanıma etki etmemiştir. Kükürt karışımı içerisindeki agrega, kür süresi uzadıkça beton hamuru ile daha iyi bir aderans geliştirmiştir.

- Eğilme dayanımı değerlerinden en düşüğünü hiçbir katkı ve agrega içermeyen K serisi vermiştir. Bunun sebebi, kükürt ilk döküldüğünde daha yüksek kıvamlı esnektir. Kurumaya başladığında eğer içerisinde herhangi bir katkı yok ise suyunu kaybeder ve gevrekleşir. Gevrekliği artan kükürdün eğilmeye karşı göstermiş olduğu kuvvette düşer. KBD serisinde bulunan disiklopentadien, karışımı daha sünek hale getirerek KB serisine göre ileri yaşlarda eğilme dayanımında önemli artış sağlamıştır. Sonuç olarak kükürtlü betonların eğilme dayanımları geleneksel betona göre bir miktar düşüktür fakat katkı kullanımı ile geleneksel betondan elde edilen eğilme dayanımı değerlerine ulaşılabilir ve geçilebilir.

- Geleneksel Portland çimentolu betonun aksine kükürt içeren karışımların hepsinde yüksek bir elektriksel direnç gözlemlenmiştir. Kür süresi arttıkça elektriksel direnç değerlerinde bir miktar artış olmuştur fakat bu değer geleneksel betonda daha fazla iken kükürt içeren KB, KBD ve K serilerinde daha azdır. Kükürt yapısı itibari ile kurudukça daha dirençli hale gelir. Numunelerin suya doygun hale getirilmesine rağmen elektriksel direnç değerlerinde düşüş yaşanmamıştır. Bu deneysel çalışmada en yüksek elektriksel direnç değerlerini agrega ve katkı içermeyen saf kükürt karışımları vermiştir. Buradan agreganın ve disiklopentadien'in, betonun elektriksel iletkenliğini arttırdığı sonucuna varılabilir.

- Kılcallık katsayılarına bakıldığında, katkı içermeyen agregalı KB serisinin kılcallık katsayısı yani geçirimsizliği, kontrol serisine göre daha yüksek çıkmıştır. Bunda agregaların oluşturduğu kapiler boşluklar etkilidir. Fakat katkı kullanılması ile KBD serisi kalıba daha iyi yerleşmiş ve kılcal boşlukların dolması ile betonun su emme değeri bir miktar düşürülmüştür. Agregaya içermeyen ve saf kükürtten oluşan K serisinin beton hamuru tamamen boşluksuz bir kükürt eriyiğinden oluştuğu için su emme kapasitesi düşük çıkmış ve buda kılcal geçirimsizlik katsayısının düşük çıkması ile sonuçlanmıştır. Kür süresinin kılcallık katsayısına etkisi sadece kontrol ve KB serisinde görülmüş, diğer serilerde (KBD serisi) zamana bağlı olarak su emme değerinde kayda değer bir değişiklik fark edilmemiştir.

Bu tez çalışması sonucunda, giderek azalan doğal kaynaklarımız ve çimento üretimi sonucu ortaya çıkan karbondioksit de göz önüne alınacak olursa, geleneksel çimentonun yerine gittikçe miktarı dünya genelinde artan kükürdün kullanımını yaygınlaştırmak amaçlanmıştır. Kükürdün mekanik ve dayanıklılık özellikleri geleneksel betonunkine yaklaşık hatta bazı durumlarda daha iyidir. Kükürt kullanımının yaygınlaşarak su bulunmayan bölgelerde de beton dökümü sağlanması bu çalışmanın amaçlarındandır. Bu tez çalışmasının, atık olarak depolanan kükürdün değerlendirilmesi ve yeni kullanım alanlarının bulunması konusunda yapılacak diğer çalışmalara ışık tutacağı düşünülmektedir. Bu çalışmanın son kısmı olarak kükürtlü beton hakkında bazı öneriler aşağıda verilmiştir:

### ***Öneriler;***

- Hızlı ve yüksek dayanıklılık özelliği ve yapı elemanının hasar görmesi halinde dönüştürülebilirliği nedeniyle prekast yapılarda uygulanmasının uygundur ve

önerilir. Kükürdün agresif ortamlarda (kimyasal etki, korozyon ve aşınma) direncinin yüksek olması nedeniyle kaldırımlarda, kimyasal tesislerde, hava pistlerinde, düşük sıcaklıklı alanlarda ve deniz ortamında elemanların kaplamasında başarılı olabilir. Buradan yola çıkarak yapılan korunaklar, güvenlik kulübeleri, hatta yaşam alanları herhangi bir deformasyon durumunda kolay ve hızlı bir şekilde tamir edilebilir ve geri dönüştürülebilir.

- Askeri yapılarda kullanılabilir. Patlama veya saldırı sonrası ortaya çıkan tahribatlarda yapı kısa sürede lokal olarak güçlendirilebilir. Kükürtlü beton, yaklaşık 10 dakika da prizini alabilmekle birlikte 24 saat gibi kısa bir sürede dayanımının yaklaşık %80'inden fazlasını kazanabilmektedir. Bu özellik portland çimentolu beton ile karşılaştırıldığında çok hızlı gerçekleşmektedir. Kükürtlü betonun özeliği savunma sanayisinde, operasyon sahalarında, hızlı mobilizasyon ve hareket kabiliyeti açısından çok avantaj ve zaman kazandırılacağı düşünülmektedir. Kısa bir sürede kullanılabilir hale gelen kükürtlü beton; uzun kullanım ömrü, saldırılara karşı daha yüksek dayanım, geri dönüştürülebilir kolay onarım gibi özellikleri ile askeri yapılarda kullanılması avantajlıdır.

- Kükürtlü betonun çimentolu betona göre daha hızlı dayanım alması önemli bir avantajdır. Böylece bu betonun özellikle Ay'da üretimi yapılacak inşaatın daha hızlı tamamlanmasını sağlayabilir. Su bulunmayan ortamlarda (kale-kollar, dağlardaki askeri yapılar) beton dökümüne imkân sağlaması, kükürtlü betonların en önemli avantajlarından biridir.

- Çalışmanın amacı dünyadaki kükürt üretimindeki artış nedeniyle açığa çıkan kükürdün yeni tüketim alanları oluşturularak değerlendirilmesi, kükürdün stoklanması sırasında oluşan çevresel kirliliğin azaltılması, inşaat yapı sektörüne yeni ve uygun maliyetli bir yapı malzemesi kazandırılması, Portland çimento kullanımının azaltılarak çimento üretimi sırasında ortaya çıkan CO<sub>2</sub> emisyonu miktarının azaltılması, elde edilecek sonuçlar ile bir çok özelliği belirlenen kükürdün farklı yapı alanlarında da kullanılabilmesi şeklinde genel olarak özetlenebilir.

- PÇB'lere ait standartlar içerisinde yer alan eşitliklerin, kükürt bağlayıcılı betonlar için geçerliliğinin olmadığı tarafımızca düşünülmektedir. Yapılan birçok döküm

sonucunda kükürt bağlayıcılı betonların hava koşullarından etkilendiği ve bu betonların prefabrik yapı elemanlarının imalatında kullanımının betonun performans değerlerinde kayıp yaşanmadan kullanılabilirliği açısından daha iyi olacağı tarafımızca önerilmektedir.

- Kükürtlü beton yüksek ısı ile bağlayıcılık kazanmaktadır. Bunun yanında onarılabilme ve geri dönüşümü de ısı ile olmaktadır. Bu özeliği yangına karşı dayanımına olumsuz etki etmektedir. Yapılarda kükürtlü betonun kullanımında yangına karşı dayanıklı kaplamalar yapılması dolayısıyla kükürtlü betonun deformasyonun engellenmesi/azaltılması öngörülmektedir.



## KAYNAKLAR DİZİNİ

- Abd El Haleem, S.M., Abd El Wanees, S., Abd El Aal, E.E., Diab, A., 2010, Environmental factors affecting the corrosion behaviour of reinforcing steel. Variation in pitting corrosion current in relation to the concentration of the aggressive and inhibitive ions. *Corrosion Science*, 52(5), 1675-1683.
- Abdel-Jawad, Y., Al-Qudah, A., 1994, The Combined Effect of Water and Temperature on the Strength of Sulfur Concrete, *Cement and Concrete Research*, 24(1), 165-175.
- Afzal, S., Khan, Z.R., 2018, A Review Paper on Factors Affecting Ready- Mix Concrete Delivery Pattern, *International Journal of Construction Engineering and Management*, 7(3), 97-100.
- Albayrak, U., Albayrak, G., 2016, Investigation of Ready Mixed Concrete Transportation Problem Using Linear Programming and Genetic Algorithm, *Civil Engineering Journal*, Şubat, 2(10), 491-496.
- Al-Otaibi, S., Al-Aibani, A., Al-Bahar, S., Abdulsalam, M., Al-Fadala, S., 2019, Potential for producing concrete blocks using sulphur polymeric concrete in Kuwait. *Journal of King Saud University-Engineering Sciences*, 31(4), 327-331.
- Al-Tayyib, A.J., Khan, M.S., 1988, Evaluation of Corrosion Resistance of Reinforced Steel in Sulfur Concrete, *International Journal for Housing Science and Its Applications*, 12(4).
- Akkurt, F., Kaya, N., Alıcılar, A., 2009, Phase transitions, order parameters and threshold voltages in liquid crystal systems doped with disperse orange dye and carbon nanoparticles, *Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures*, 17(6), 616-624.
- ASTM C 1876, 2019, Standard Test Method for Bulk Electrical Resistivity or Bulk Conductivity of Concrete. ASTM International.
- ASTM C-127, 2007, Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate, American Society for Testing and Materials, Pennsylvania.
- ASTM C-128, 2015, Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate, American Society for Testing and Materials, Pennsylvania.
- ASTM C-138, 2001, Standard Test Method for Density (Unit Weight), Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete, American Society for Testing and Materials, Pennsylvania.
- ASTM C-293, 2016, Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam With Center-Point Loading), American Society for Testing and Materials, Pennsylvania.

## KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- ASTM C597-16, 2016, Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete, ASTM International.
- Birkham, T.K., Hendry, M.J., Barbour, S.I., 2010, Advective and Diffusive Gas Transport Through Fractured Sulfur Blocks, *Vadose Zone Journal*, 9(2), 451-461.
- Cai, L., Ding, L., Luo, H., Yi, X., 2019, Preparation of autoclave concrete from basaltic lunar regolith simulant: Effect of mixture and manufacture process. *Construction and Building Materials*. 207: 373-386.
- Çavdar, A., Yetgin, Ş., 2010, Investigation of Abrasion Resistance of Cement Mortar with Different Pozzolan Compositions and Subjected to Sulfated Medium, *Construction and Building Materials*, 24, 461-470.
- Çerçevik, A.E., Toklu, Y.C., Kandemir, S.Y., Yaylı, M.Ö., 2018, Recent Innovations in Building Production Using 3D Printing Technology. *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*. 2(2), 116-122.
- Ciak, N., Harasymiuik, J., 2013, Sulphur Concrete's Technology and Its Application to the Building Industry, *Technical Sciences*, 16(4), 323-331.
- Contreras, M., Gazquez, M.J., Garcia-Diaz, I., Alguacil F.J., Lopez, F.A., Bolivar, J.P., 2013, Valorization of Waste Ilmenite Mud in the Manufacture of Sulphur Polymer Cement, *Journal of Environmental Management*, 128, 625-630.
- Dehestani, M., Teimortashlu, E., Molaei, M., Ghomian, M., Firoozi, S., Aghili, S., 2017, Experimental Data on Compressive Strength and Durability of Sulfur Concrete Modified by Styrene and Bitumen, *Data Brief* 13, 137-144.
- Dugarte, M., Martinez-Arguelles, G., Torres, J., 2018, Experimental Evaluation of Modified Sulfurous Concrete for Achieving Sustainability in Industry Applications, 11(1):1-16.
- Faramarzi, M., Golestani, B., Lee, K.W., 2017, Improving Moisture Sensitivity and Mechanical Properties of Sulfur Extended Asphalt Mixture by NanoAntistripping Agent, *Construction and Building Materials*, 133, 534- 542.
- Garcia, V., Vázquez, E., Carmona, S., 2004, Utilization of by-produced sulfur for the manufacture of unmodified sulfur concrete. In *Int. RILEM Conference on the Use of Recycled Materials in Building and Structures*, November, pp. 1054-1063.
- Gursel, A.P., Masanet, E., Horvath, A., Stadel, A., 2014, Life-Cycle Inventory Analysis of Concrete Production: A Critical Review, *Cement and Concrete Composites*, 51, 38-48.

## KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Hou, X., Ding, T., Chen, Y., Liu, M., Deng, L., 2019, Constitutive properties of irregularly shaped lunar soil simulant particles. *Powder Technology*, 346: 137-149.
- Hu X., Zhang H., Bai T., Pan P., Xu P., Walubita L.F., 2019, Effects of Using Brake Pad Waste Powder as a Filler Material on the Rheological and Mechanical Properties of a Sulfur Modified Asphalt Mixture, *Construction and Building Materials*, 198, 742-750.
- Karakoç, M.B., Demirboğa, R., Türkmen, İ., Can, İ., 2011, Modeling with ANN and Effect of Pumice Aggregate and Air Entrainment on the Freeze-Thaw Durabilities of HSC, *Construction and Building Materials*, 25, 4241- 4249.
- Khademi, A.G., Sar, H.I.K., 2015, Comparison of Sulfurous Concrete, Cement Concrete and Cement-sulfurous Concrete and Their Properties and Application. *Current World Environment*. 10, 201-207.
- Khoshnevis, B., Yuan, X., Zahiri, B., Zhang, J., Xia, B., 2016, Construction by Contour Crafting Using Sulfur Concrete with Planetary Applications, *Rapid Prototyping*, 22(5), 848-856.
- Khoshnevis, B., 2004, Automated construction by contour crafting - Related robotics and information Technologies. *Automation in Construction*, 13(1), 5-19.
- Koh, S.W., Yoo, J., Bernold, L.E., Lee, T.S., 2010, Experimental study of waterless concrete for lunar construction. In *Earth and Space 2010, Engineering, Science, Construction, and Operations in Challenging Environments*, 1098-1102.
- Kucharczykova, B., Karel, O., Danek, P., Kocab, D., Pössl, P., 2017, Comparison of Measurements Methods Intended to Determination of the Shrinkage Development in Polymer Cement Mortars, *Procedia Engineering*, 195, 17-23.
- Lee, S.H., Hong K.N., Park J.K., Ko J., 2014, Influence of Aggregate Coated with Modified Sulfur on the Properties of Cement Concrete, *Materials*, 7, 4739-4754.
- Loov, A.H., Vroom, M.A., 1974, Ward, Sulfurous Concrete-A New Construction Material, *PCI Journal*. January-February, 86-95.
- Maraghechi, H., Ahmadi, I.F., Motahari, S., 2011, Effect of Adding Crumb Tire Rubber Particles on the Mechanical Properties of DCPD-Modified Sulfur Polymer Mortars, *Journal of Mechanics of Materials and Structures*, 6(10), 1283-1294.
- Mohamed, A.M.O., Gamal, M.E., 2007, Sulfur Based Hazardous Waste Solidification, *Environmental Geology*, 53(1), 159-175.

## KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Mohamed, A.M.O., El-Dieb, A., Sawy, K.M.E., 2015, Gamal, Durability of modified sulfurous concrete in sewerage environment. *Environmental Geotechnics*, 2(2): 95-103.
- Moon, J., Kalb, P.D., Milian, L., Northrup, P.A., 2016, Characterization of a Sustainable Sulfur Polymer Concrete Using Activated Fillers, *Cement and Concrete Composites*, 67: 20-29.
- Morin, V., Moevus, M., Dubois-Brugger, I., Gartner, E., 2011, Effect of Polymer Modification of the Paste-Aggregate Interface on the Mechanical Properties of Concretes, *Cement and concrete Research*, 41, 459-466.
- Narmin, B.A., Mitra M.H., Nahid M.H., 2008, Preparation of Sulfur Mortar from Modified Sulfur, *Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering*, 27(1): 123-127.
- Omar, H.A., 1993, Production of Lunar Concrete Using Molten Sulfurous. Final Research Report for JoVe NASA Grant NAG8– 278.
- Öztürk, O., 2019, Kükürt ve Kükürt Polimer Betonların Mekanik ve Dayanıklılık Özelliklerinin İncelenmesi, Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- Puoya H.S., Ganjian E., Parhizkar T., Zamani A., 2010, Properties and Application of Polymer Modified and Sulphur Repair Mortars in Aggressive Environments, 2nd International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies, Ancona, Italy, 28-30 June.
- Shin, M., Kim, K., Gwon, S. and Cha, S., 2014, Durability of sustainable sulfur concrete with fly ash and recycled aggregate against chemical and weathering environments. *Construction and Building Materials*, 69, 167–176.
- Souaya, E.R., Elkholy, S.A., Abd El-Rahman A.M.M., El-Shafie M., Ibrahim I.M., Abo-Shanab Z.L., 2015, Partial Substitution of Asphalt Pavement with Modified Sulfur, *Egyptian Journal of Petroleum*, 24(4), 483-491.
- Toklu, Y.C., Çerçevik, A.E., Şahinöz, M., 2017, Determination of Materials to be Used in Automated Building Production Technology. *Journal of Süleyman Demirel University Science Institute*, 21(1): 51-57.
- Topçu, İ.B., Boğa, A.R., Demir, A., 2011, Influence of cover thickness on the mechanical properties of steel bar in mortar expose to high temperatures, *Fire and Materials*, 35(2), 93-103.
- Topçu, İ.B., Danış, M.E., 2022, Using Sulphur Concrete on Defense Buildings. *Journal of Polytechnic*. 10.2339/politeknik.722423.

## KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Topçu, İ.B., Uğurlu, A., 2002, TS 500/2000 Standartlarının Beton Açısından İncelenmesi, ECAS-2002 Uluslararası Yapı ve Deprem Mühendisliği Sempozyumu, Ortadoğu Teknik Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 492-499.
- Topçu, İ.B., Uzunömeroğlu, A., 2019, Properties of Corrosion Inhibitors in Reinforced Concrete, International Civil Engineering and Architecture Conference 2019 (ICEARC'19), 17-20 April 2019, Trabzon, Turkey, ss. 1999-2010.
- Topçu, İ. B., Şengel, S., 2004, Properties of concretes produced with waste concrete aggregate. Cement and concrete research, 34(8), 1307-1312.
- Topçu, İ. B., Canbaz, M., 2004, Properties of concrete containing waste glass. Cement and concrete research, 34(2), 267-274.
- Topçu, İ. B., Canbaz, M., 2007, Effect of different fibers on the mechanical properties of concrete containing fly ash. Construction and Building Materials, 21(7), 1486-1491.
- Topçu, İ.B., Karakurt, C., 2008, Properties of Reinforced Concrete Steel Rebars Exposed to High Temperature. Research Letters in Materials Science, Vol. 2008, 1-4.
- Toutanji, H.A., Evans, S. and GrugelR. N., 2012, Performance of lunar sulfur concrete in lunar environments, Construction and Building Materials, 29, 444-448.
- TS EN 12390-3, 2010, Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 3: Deney numunelerinde basınç dayanımının tayini, Türk Standartları Enstitüsü.
- TS EN 12390-7, 2019, Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 7: Sertleşmiş beton yoğunluğunun tayini, Türk Standartları Enstitüsü.
- TS EN 12504-1, 2019, Beton - Yapıda beton deneyleri - Bölüm 1: Karot numuneler - Karot alma, muayene ve basınç dayanımının tayini, Türk Standartları Enstitüsü.
- TS EN 197-1, 2012, Çimento - Bölüm 1: Genel çimentolar - Bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri, Türk Standartları Enstitüsü.
- TS EN 206:2013+A1, 2017, Beton-Özellik, Performans, İmalat ve Uygunluk, Türk Standardı, Ocak, Ankara.
- TS EN 480-5, 2008, Kimyasal katkıları - Beton, harç ve şerbet için - Deney metotları - Bölüm 5: Kılcal su emme tayini, Türk Standartları Enstitüsü.
- TS EN 932-1, 1997, Agregaların Genel Özellikleri İçin Deneyler-Kısım 1 Numune Alma Metotları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

## KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- TS EN 933-1, 2012, Agregaların Geometrik Özellikleri İçin Deneyler - Bölüm 1: Tane Büyüklüğü Dağılımının Tayini-Elleme Yöntemi, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Tunç, G., Demirtürk, D., 2016, Susuz Beton ve Türkiye Gerçeği. Hazır Beton, Nisan, 69-82.
- Vlahovic M.M., Savic M.M., Martinovic S.P., Boljanac T.D., Volkov-Husovic T.D., 2012, Use of Image Analysis for Durability Testing of Sulfur Concrete and Portland Cement Concrete, Materials and Design, 34, 346-354.
- Vlahovic, M.M., Martinovic, S.P., Boljanac, T.D., Jovanic, P.D., Volkov-Husovic, T.D., 2011, Durability of sulfur concrete in various aggressive environments. Construction and Building Materials, 25, 3926–3934.
- Wagenfeld J.G., Khalid A.A., Almheiri S., Slavens A.F., Calvet N., 2019, Sustainable Applications Utilizing Sulfur, A By-Product from Oil and Gas Industry: A State of the Art Review, Waste Management, 95: 78-89.
- Wan, L., Wendner, R., Cusatis, G., 2016, A novel material for in situ construction on Mars: experiments and numerical simulations. Construction and Building Materials, 120, 222-231.
- Yang C., Lv X., Tian X., Wang Y., Komarneni S., 2014, An Investigation on the Use of Electrolytic Manganese Residue as Filler in Sulfur Concrete, Construction and Building Materials, 73, 305-310.
- Yue L., Caiyun J., Yunping X., 2006, The Properties of Sulfur Rubber Concrete (SRC), J. Wuham Univ. Technol. Mater. Sci., 21(1), 129-133.
- Yuan, X., Zhang, J., Zahiri, B., Khoshnevis, B., 2016, Performance of Sulfur Concrete in Planetary Applications of Contour Crafting.
- Zhihui Z., Shoude W., Lingchao L., Chenchen G., 2013, Evaluation of Pre-Coated Recycled Aggregate for Concrete and Mortar, Construction and Building Materials, 43, 191-196.