



**TEKSTİL, KAĞIT VE DOĞAL TAŞ ENDÜSTRİSİ  
ATIKLARININ TAŞIYICI VE TAŞIYICI OLMAYAN  
HAFİF BETON ÜRETİMİNDE KULLANIMI**

**Ömer BAYRAK**

**Doktora Tezi**

**İnşaat Mühendisliği**

**Ana Bilim Dalı**

**Prof. Dr. Emin ERDEM**

**2025**

**(Her Hakkı Saklıdır)**

**T.C.**  
**BAYBURT ÜNİVERSİTESİ**  
**LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**  
**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**  
**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ DOKTORA PROGRAMI**

**TEKSTİL, KAĞIT VE DOĞAL TAŞ ENDÜSTRİSİ ATIKLARININ TAŞIYICI VE  
TAŞIYICI OLMAYAN HAFİF BETON ÜRETİMİNDE KULLANIMI**

**DOKTORA TEZİ**

**Ömer BAYRAK**

**Danışman: Prof. Dr. Emin ERDEM**

**BAYBURT - 2025**

## KABUL VE ONAY

Prof. Dr. Emin ERDEM danışmanlığında, Ömer BAYRAK tarafından hazırlanan “Tekstil, Kağıt ve Doğal Taş Endüstrisi Atıklarının Taşıyıcı ve Taşıyıcı Olmayan Hafif Beton Üretiminde Kullanımı” başlıklı bu çalışma, 23.07.2025 tarihinde yapılan savunma sınavı sonucunda oy birliği ile başarılı bulunarak jürimiz tarafından Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Emin ERDEM .....

Üye : Prof. Dr. Metin İPEK .....

Üye : Doç. Dr. Ramazan DONAT .....

Üye : Doç. Dr. Hakan Alper KÂMİLOĞLU .....

Üye : Prof. Dr. Serkan SUBAŞI .....

Bu tezin kabulü Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun ...../...../20... tarih ve 20...../.....-..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Doç. Dr. Bünyamin ALİM  
Enstitü Müdürü

## BEYANNAME

Bayburt Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre Prof. Dr. Emin ERDEM danışmanlığında hazırlamış olduğum “Tekstil, Kağıt ve Doğal Taş Endüstrisi Atıklarının Taşıyıcı ve Taşıyıcı Olmayan Hafif Beton Üretiminde Kullanımı” başlıklı doktora tezimin bilimsel etik değerlere ve kurallara uygun, özgün bir çalışma olduğunu, aksinin tespit edilmesi halinde her türlü yasal yaptırımını kabul edeceğimi beyan ederim.

23.07.2025

Ömer BAYRAK



## ÖN SÖZ

Tez çalışmamın başlangıcından sonuna kadar beni sabırla destekleyen, bilgi ve tecrübelerini tezimin olgunlaşmasından bitimine kadar benden esirgemeyen kıymetli Danışman Hocam Sayın Prof. Dr. Emin ERDEM'e şükranlarımı sunarım. Tez süresince sürekli her türlü zorluklara katlanmış ve bu süreç boyunca her türlü desteğini esirgemeyen kıymetli aileme teşekkür ederim. Tez çalışmalarımı gerçekleştirdiğim Bayburt Üniversitesi Mühendislik Fakültesinin ve özellikle İnşaat Mühendisliği Bölümünün saygıdeğer akademik ve idari personeline, çalışmalarım sırasında hammaddeleri temin ettiğim OYKA Kağıt Fabrikasına, Aşkale Çimento Fabrikasına ve Bayburt'taki işletmelere verdikleri destek için ayrı ayrı teşekkür ederim.

Ömer BAYRAK

## ÖZET

### DOKTORA TEZİ

# TEKSTİL, KAĞIT VE DOĞAL TAŞ ENDÜSTRİSİ ATIKLARININ TAŞIYICI VE TAŞIYICI OLMAYAN HAFİF BETON ÜRETİMİNDE KULLANIMI

Ömer BAYRAK

Bayburt Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Emin ERDEM

Bayburt-2025, Sayfa: 133

Tüm dünyada artan insan nüfusuna paralel olarak insanların ihtiyaçları da sürekli artmaktadır. Bu durum, hemen her alanda endüstrileşmeyi de beraberinde getirmektedir. Sanayileşmeden kaynaklanan yan ürünler ve endüstriyel atıklar tehlikeli sayılabilecek çevre sorunlarına neden olabilmektedir. Hem endüstriyel atıkların çevreye olan olumsuz etkilerinin azaltılması hem de atıkların geri dönüştürülerek ve farklı alanlarda tekrar kullanılarak ekonomiye kazandırılmasına yönelik çalışmalar artarak devam etmektedir.

Bu çalışmada atık Bayburt tüfü agrega olarak ve kağıt fabrikası atıklarından elde edilen katı lignin ile tekstil fabrikalarının atık sularından elde edilen reaktif boyar maddeler (RBM) beton katkı maddesi olarak kullanılarak taşıyıcı hafif beton (THB) ve taşıyıcı olmayan hafif beton (TOHB) üretimi amaçlandı. Atık agregaların en büyük tane çapı ( $D_{max}$ ), piyasada kullanılan perlit ile karşılaştırma yapabilmek amacı ile 11,2 mm olarak belirlendi.

Katı lignin, kağıt fabrikası atıklarından elde edilen lignin likörünün asidik ortamda çöktürülüp kurutulmasıyla elde edildi. Tekstil boyamada kullanılan atık reaktif boyar maddeler model çözelti olarak hazırlandı. Tekstil, kağıt ve doğal taş endüstrisi atıklarından üretilen hafif beton karışımları  $10 \times 10 \times 10$  cm ölçülerindeki kalıplara dökülerek numunelere 7, 28 ve 90 gün sonra basınç dayanım testleri uygulandı. THB için en az 30 MPa (TS 206, LC 25/28'de) ve TOHB için minimum 5 MPa basınç dayanımına sahip hafif beton üretilmesi amaçlandı. Endüstriyel değerlendirilmesi hedeflenen Bayburt taşı (BT), TS 802'ye uygun,  $D_{max}$  8 mm olacak şekilde ve Fuller eğrisine önemli ölçüde uyumlu granülometride hazırlandı. BT agregaları ile  $450 \text{ kg/m}^3$  sabit çimento dozajı, sabit çökme ( $S_2$ , 5-9 cm) değeri ve 0,50 sabit su/çimento kullanılarak THB karışımları hazırlandı. 28 gün boyunca kirece doygun suda kürlen numunelere basınç dayanım testi gerçekleştirildi. Atık maddeler kullanılarak hazırlanan betonların hidrasyonu; mekanik testler, XRD, EDS, SEM, DTA/TG/DTG teknikleriyle izlendi.

Sonuç olarak; Bayburt sarı taşı (BST) agregasının puzolanik özelliğinin olmayışı, birim hacim ağırlık (BHA) değerinin yüksek olması ( $2,06 \text{ g/cm}^3$ ) ve öz dayanımının düşük olması gibi nedenlerle hafif beton üretiminde kullanılamayacağı ancak normal beton agregası olarak başarıyla kullanılabileceği, Bayburt beyaz taşı (BBT) agregasının puzolanik özelliğinin varlığı ve öz dayanımının yüksek, BHA değerinin  $2 \text{ g/cm}^3$ 'ten düşük olması, bu agreganın doğrudan hafif beton üretiminde başarı ile kullanılabileceğini, ayrıca BBT agregasını kirece ve sodaya doygun ortamlarında bekletilerek mukavemetlerinin iyileşmesi ile THB üretiminde de başarı ile kullanılabileceği belirlendi.

Karışımlara lignin %0,6 ve RBM'lerin %0,04 katı madde olarak katılması, betonda süper akışkanlaştırıcı (SA) etki göstererek, üretilen betonların dayanımlarını artırdığı ayrıca RBM'lerin betonu kalıcı olarak renklendirdiği, bu şekilde bir kullanım ile bir yandan atıkların neden olduğu çevre problemlerinden kurtulunurken diğer yandan atıkların endüstriyel olarak değerlendirilebileceği belirlendi. BBT'nin 0-0,063 mm aralığında öğütülerek çimentoya %30'a kadar ikame edildiğinde THB ve TOHB'lerin özellikle 90 günlük dayanımlarında ciddi bir azalma oluşmadığı tespit edildi.

**Anahtar Kelimeler:** Bayburt tüfit, hafif beton, lignin, reaktif boyar madde.

## **ABSTRACT**

### **PH. D. THESIS**

# **USE OF TEXTILE, PAPER AND NATURAL STONE INDUSTRY WASTES IN STRUCTURAL AND NON-STRUCTURAL LIGHTWEIGHT CONCRETE PRODUCTION**

**Ömer BAYRAK**

**Bayburt University**

**Institute of Graduate Studies**

**Department of Civil Engineering**

**Thesis Advisor: Prof. Dr. Emin ERDEM**

**Bayburt-2025, Pages: 133**

In parallel with the increasing human population all over the world, people's needs are constantly increasing. This situation brings industrialization in almost every field. By-products and industrial wastes resulting from industrialization can cause environmental problems that can be considered dangerous. Efforts to both reduce the negative effects of industrial waste on the environment and to bring waste into the economy by recycling and reusing it in different areas continue to increase.

In this study, the largest grain diameter ( $D_{max}$ ) of waste Bayburt tuff aggregate was determined as 11,2 mm in order to make a comparison with perlite used in the market. It was aimed to produce structural (SLC) and structural lightweight concrete (NSLC) by using solid lignin (L) obtained from paper mill waste and reactive dyestuffs (RD) obtained from wastewater of textile factories as concrete additives.

Solid lignin was obtained by precipitating and drying the lignin liquor obtained from paper mill waste in an acidic environment. Waste reactive dyes used in textile dyeing were prepared as model solutions. Lightweight concrete mixtures produced from textile, paper and natural stone industry wastes were poured into molds measuring 10×10×10 cm and compressive strength tests were applied to the samples after 7, 28 and 90 days.

It was aimed to produce lightweight concrete with a compressive strength of at least 30 MPa for SLC (in TS 206, LC25/28) and a minimum of 5 MPa for NSLC. Bayburt stone (BS), which was targeted for industrial evaluation, was prepared in granulometry in accordance with Turkish Standards (TS) 802,  $D_{max}$  8 mm and significantly compatible with the Fuller curve. SLC mixtures were prepared using BS aggregates, with a fixed cement dosage of 450 kg/m<sup>3</sup>, a constant slump (S2, 5-9 cm) and a constant water/cement ratio of 0,50.

Strength tests were performed on samples cured in lime-saturated water for 28 days. Hydration of concrete prepared using waste materials was monitored by mechanical tests, XRD, EDS, SEM, DTA/TG/DTG techniques.

As a result, it was determined that Bayburt yellow stone (BYS) aggregate cannot be used in lightweight concrete production due to its lack of pozzolanic properties, high unit weight (UW) value ( $2,06 \text{ g/cm}^3$ ), and low inherent strength. However, it can be successfully used as a standard concrete aggregate. Bayburt white stone (BWS) aggregate, with its pozzolanic properties, high inherent strength, and UW value of less than  $2 \text{ g/cm}^3$ , can be successfully used directly in lightweight concrete production. Furthermore, it was determined that BWS aggregate can also be successfully used in SLC production due to its strength improvement when stored in lime and soda-saturated environments. It was determined that adding 0.6% lignin and 0.04% RD to the mixtures increased the strength of the concrete by acting as a superplasticizer (SP). Furthermore, RDs permanently colored the concrete. This approach not only eliminates environmental problems caused by waste but also allows for industrial utilization of the waste. It was determined that when BWS was ground to a 0-0.063 mm particle size and incorporated into the cement up to 30%, there was no significant decrease in the 90-day strength of SLC and NSLC.

**Keywords:** Bayburt tuffite, lightweight concrete, lignin, reactive dyestuff.

## İÇİNDEKİLER

|                                                                             |      |
|-----------------------------------------------------------------------------|------|
| KABUL VE ONAY .....                                                         | II   |
| BEYANNAME .....                                                             | III  |
| ÖN SÖZ .....                                                                | IV   |
| ÖZET .....                                                                  | V    |
| ABSTRACT .....                                                              | VII  |
| İÇİNDEKİLER .....                                                           | IX   |
| TABLOLAR .....                                                              | XII  |
| ŞEKİLLER .....                                                              | XIII |
| KISALTMALAR .....                                                           | XVI  |
| SİMGELER .....                                                              | XVII |
| GİRİŞ .....                                                                 | 1    |
| BİRİNCİ BÖLÜM .....                                                         | 4    |
| 1. KURAMSAL ÇERÇEVE .....                                                   | 4    |
| 1.1. HAFİF BETON .....                                                      | 4    |
| 1.1.1. Hafif Betonun Tarihi .....                                           | 4    |
| 1.1.2. Hafif Betonun Sınıflandırılması .....                                | 4    |
| 1.1.2.1. Yalıtım hafif betonu .....                                         | 5    |
| 1.1.2.2. Yapısal olmayan hafif beton .....                                  | 5    |
| 1.1.2.3. Yapısal hafif beton .....                                          | 5    |
| 1.1.3. Hafif Betonun Üretim Yöntemleri .....                                | 6    |
| 1.1.3.1. Betonun içerisine havasürükleyerek hafif beton üretimi .....       | 6    |
| 1.1.3.2. Sadece kalın agrega kullanarak hafif beton üretimi .....           | 6    |
| 1.1.3.3. Hafif agrega kullanılarak hafif beton üretimi .....                | 6    |
| 1.1.4. Hafif Agregalar .....                                                | 7    |
| 1.1.4.1. Pomza (PM) .....                                                   | 7    |
| 1.1.4.2. Perlit (PR) .....                                                  | 8    |
| 1.1.4.3. Genleştirilmiş Kil .....                                           | 9    |
| 1.1.4.4. Yüksek fırın cürufu (YFC) .....                                    | 10   |
| 1.1.4.5. Volkanik tüf (Bayburt tüfü) .....                                  | 10   |
| 1.2. İLK BAĞLAYICILAR VE ÇİMENTO .....                                      | 11   |
| 1.2.1. Tarihte Kullanılan İlk Bağlayıcılar ve Çimentonun Tarihi .....       | 11   |
| 1.2.1.1. Kireç .....                                                        | 11   |
| 1.2.1.2. Alçı .....                                                         | 11   |
| 1.2.2. Çimentonun Tanımı ve Hammaddeleri .....                              | 11   |
| 1.2.2.1. Kalker (Kireç taşı) .....                                          | 15   |
| 1.2.2.2. Kil .....                                                          | 16   |
| 1.2.2.3. Marn (GMA) .....                                                   | 16   |
| 1.2.3. Çimento Üretimi .....                                                | 11   |
| 1.2.4. Çimento Çeşitleri .....                                              | 11   |
| 1.2.4.1. Portland çimentosu (PÇ) .....                                      | 18   |
| 1.2.4.2. Portland çimentosunu oluşturan oksitler ve özellikleri .....       | 18   |
| 1.2.4.3. Portland çimentosunu oluşturan ana bileşenler ve özellikleri ..... | 21   |
| 1.2.5. Çimentonun Hidratasyonu ve Tanımlar .....                            | 22   |

|                                                                              |           |
|------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 1.2.5.1. Hidratasyon.....                                                    | 22        |
| 1.2.5.2. Priz.....                                                           | 23        |
| 1.2.5.3. Ani priz .....                                                      | 23        |
| 1.2.6. Hidratasyon Sonucu Oluşan Ürünler ve Özellikleri .....                | 23        |
| 1.2.6.1. C-S-H (Tobermorit) fazı.....                                        | 23        |
| 1.2.6.2. CH (Sönmüş kireç) .....                                             | 24        |
| 1.2.6.3. AFt fazları (Etringit; Trisülfat) .....                             | 25        |
| 1.2.6.4. Afm fazları (Mono sülfat).....                                      | 26        |
| 1.3. ENDÜSTRİYEL ATIKLAR VE BETONDA KULLANIMI .....                          | 26        |
| 1.3.1. Yüksek Fırın Cürufu (YFC) .....                                       | 27        |
| 1.3.2. Zeolitik Tüf (Puzolan) .....                                          | 27        |
| 1.3.2.1. Sıkı yapıllı kayalar (Tüfler) .....                                 | 28        |
| 1.3.2.2. Bayburt tüfü/taşı (BT) .....                                        | 28        |
| 1.3.3. Lignin (L) .....                                                      | 30        |
| 1.3.3.1. Atık Ligninin geri dönüşümü .....                                   | 32        |
| 1.3.3.2. Ligninin yapısı ve kullanım alanları.....                           | 32        |
| 1.3.4. Reaktif Boyar Maddeler ve Özellikleri .....                           | 33        |
| 1.3.4.1. Reaktif boyar maddelerin kimyasal yapısı .....                      | 33        |
| 1.3.4.2. Reaktif boyar maddelerin kullanım alanları .....                    | 34        |
| 1.4. LİTERATÜR TARAMASI .....                                                | 35        |
| <b>İKİNCİ BÖLÜM .....</b>                                                    | <b>41</b> |
| <b>2. MATERYAL VE YÖNTEM .....</b>                                           | <b>41</b> |
| 2.1. MATERYAL .....                                                          | 41        |
| 2.1.1. Agrega .....                                                          | 41        |
| 2.1.1.1. Perlit .....                                                        | 41        |
| 2.1.1.2. Pomza .....                                                         | 42        |
| 2.1.1.3. Bayburt sarı taşı/tüfü (BST) .....                                  | 43        |
| 2.1.1.4. Bayburt beyaz taşı/tüfü (BBT) .....                                 | 44        |
| 2.1.2. Çimento.....                                                          | 45        |
| 2.1.3. Karışım Suyu .....                                                    | 46        |
| 2.1.4. Kimyasal Katkı .....                                                  | 46        |
| 2.1.5. Katı Lignin.....                                                      | 46        |
| 2.1.6. Reaktif Boyar Maddeler .....                                          | 47        |
| 2.2. METOT .....                                                             | 48        |
| 2.2.1. Agrega Deneyleri.....                                                 | 49        |
| 2.2.1.1. Agregaların hazırlanması.....                                       | 49        |
| 2.2.1.2. Agrega tane büyüklüğü dağılımı.....                                 | 51        |
| 2.2.1.3. Agregaların yoğunluk ve su emme tayini .....                        | 54        |
| 2.2.1.4. Agregalarda nem düzenlemesi .....                                   | 54        |
| 2.2.2. Hafif Beton Karışımlarının Hazırlanması ve Taze Beton Deneyleri ..... | 55        |
| 2.2.2.1. Çökme miktarı deneyi.....                                           | 56        |
| 2.2.3. Sertleşmiş Beton deneyleri .....                                      | 57        |
| 2.2.3.1. Basınç dayanımı .....                                               | 58        |
| 2.2.3.2. Eğilme dayanımı .....                                               | 58        |
| 2.2.3.3. Taşıyıcı hafif betonlara atmosferik buhar kürü uygulaması .....     | 59        |
| 2.2.4. Agregalara Uygulanan Puzolanik Aktivite Testi .....                   | 60        |

|                                                                                          |            |
|------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 2.2.5. Ligninin Hazırlanması .....                                                       | 60         |
| 2.2.6. Reaktif Boyar Maddelerin Hazırlanması .....                                       | 61         |
| 2.2.7. Numunelere Uygulanan Mikroyapı Analizleri .....                                   | 61         |
| 2.2.8. Yeşil Benekli Bayburt Beyaz Taşının Mukavemetlerini Geliştirme Çalışmaları.....   | 61         |
| <b>ÜÇÜNCÜ BÖLÜM.....</b>                                                                 | <b>63</b>  |
| <b>3. BULGULAR VE TARTIŞMA .....</b>                                                     | <b>63</b>  |
| 3.1. BAYBURT TAŞININ (TÜF) THB VE TOHB ÜRETİMİNDE KULLANIMI .....                        | 63         |
| 3.1.1. Bayburt Sarı Taşının Minerolojik Analizi ve THB Üretiminde Kullanımı.....         | 64         |
| 3.1.2. Bayburt Beyaz Taşının Minerolojik Analizi ve THB Üretiminde Kullanımı .....       | 67         |
| 3.1.3. YBBT'nin Minerolojik Analizi ve THB Üretiminde Kullanımı .....                    | 70         |
| 3.2. KATI LİGNİNİN THB VE TOHB ÜRETİMİNDE KULLANIMI .....                                | 73         |
| 3.2.1. Katı Ligninin Optimum Kullanım Oranının Belirlenmesi .....                        | 73         |
| 3.2.1.1. Ligninin hava sürüklenme özelliği ile basınç dayanımı arasındaki ilişki.....    | 75         |
| 3.2.2. Ligninin TOHB Üretiminde Kullanımı .....                                          | 77         |
| 3.3. RBM'LERİN THB VE TOHB ÜRETİMİNDE KULLANIMI.....                                     | 78         |
| 3.3.1. Reaktif Boyar Maddelerin Optimum Kullanım Oranının Belirlenmesi. ....             | 78         |
| 3.3.2. RBM'lerin THB'de Akışkanlaştırıcı Katkı Maddesi olarak Değerlendirilmesi. ....    | 79         |
| 3.3.3. RBM'lerin TOHB'de Akışkanlaştırıcı Katkı Maddesi olarak Değerlendirilmesi.....    | 82         |
| 3.3.4. BBT ve YBBT Agregalarının Karşılaştırılması.....                                  | 84         |
| 3.4. YBBT'LERİN MUKAVEMETLERİNİ GELİŞTİRME ÇALIŞMALARI.....                              | 86         |
| 3.4.1. Kirece Doygun Suda Bekletilen YBBT Agregaları.....                                | 86         |
| 3.4.2. Sodaya Doygun Suda Bekletilen YBBT Agregaları .....                               | 87         |
| 3.4.3. YBBT Agregalarının Suda Bekletilmesi .....                                        | 89         |
| 3.4.4. Kirece Doygun Suda Bekletilen Agregalarla THB Üretimi .....                       | 91         |
| 3.4.5. Sodalı Suda Bekletilen Agregalarla THB Üretimi .....                              | 94         |
| 3.4.6. Suda Bekletilen Agregalarla THB Üretimi .....                                     | 96         |
| 3.4.7. Ligninin İyileştirme Yapılan Agregalarla Üretilen THB'lerdeki Etkisi .....        | 97         |
| 3.4.8. RBM 1 Katkısının İyileştirme Yapılan Agregalarla Üretilen THB'lerdeki Etkisi..... | 98         |
| 3.4.9. YBBT Agregalı THB'lere Atmosferik Buhar Kürü Uygulaması .....                     | 99         |
| 3.5. BBT VE YBBT'NİN ÇİMENTO İKAME OLARAK KULLANILMASI.....                              | 100        |
| 3.5.1. THB Üretiminde YBBT Tozunun İkame Malzemesi Olarak Kullanılması .....             | 101        |
| 3.5.1.1. 7, 28 ve 90 günlük dayanımlar ve katkıların etkisi .....                        | 102        |
| 3.5.1.2. YBBT ikame oranlarının THB'ye etkisi .....                                      | 107        |
| 3.5.2. TOHB Üretiminde BB'nin Çimento İkame Malzemesi Olarak Kullanılması .....          | 108        |
| 3.5.3. %30 YBBT İkamesi ile Katkıların THB'deki Etkisi.....                              | 110        |
| 3.6. MALİYET ANALİZİ .....                                                               | 110        |
| 3.6.1. Üretilen TOHB'lerin Maliyet Analizi .....                                         | 113        |
| 3.6.2. Üretilen THB'lerin Maliyet Analizi.....                                           | 115        |
| <b>SONUÇ VE ÖNERİLER .....</b>                                                           | <b>117</b> |
| <b>KAYNAKÇA.....</b>                                                                     | <b>121</b> |
| <b>ÖZ GEÇMİŞ .....</b>                                                                   | <b>133</b> |

## TABLOLAR

|                                                                                                                                     |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Tablo 1:</b> PÇ'yi Oluşturan Ana Bileşenler ve Yaklaşık Miktarları.....                                                          | 21  |
| <b>Tablo 2:</b> ASTM'ye Göre PÇ'yi Oluşturan Ana Bileşenler ve Yaklaşık Miktarları .....                                            | 21  |
| <b>Tablo 3:</b> Bazı Trasların Kimyasal Özellikleri.....                                                                            | 29  |
| <b>Tablo 4:</b> Mollaköy/Erzincan Perlit Agregasına Ait Fiziksel Özellikler .....                                                   | 41  |
| <b>Tablo 5:</b> Mollaköy/Erzincan Perlit Agregasına Ait Fiziksel Özellikler .....                                                   | 42  |
| <b>Tablo 6:</b> Erzincan Pomzasına Ait Oksit Değerleri .....                                                                        | 42  |
| <b>Tablo 7:</b> Erzincan Pomzası Fiziksel Özellikleri .....                                                                         | 43  |
| <b>Tablo 8:</b> BST'nin Kimyasal, Fiziksel ve Mekanik Özellikleri .....                                                             | 43  |
| <b>Tablo 9:</b> BBT'nin Fiziksel ve Mekanik Özellikleri.....                                                                        | 44  |
| <b>Tablo 10:</b> Çimentonun Kimyasal ve Fiziksel Analiz Sonuçları .....                                                             | 45  |
| <b>Tablo 11:</b> Kullanılan Akışkanlaştırıcılar ve Fiziksel Özellikleri.....                                                        | 46  |
| <b>Tablo 12:</b> Kullanılan Lignin Lükörünün Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri.....                                                  | 46  |
| <b>Tablo 13:</b> HB Üretiminde Kullanılan RBM'lere Ait Kimyasal Özellikler ve Ticari Adı .....                                      | 47  |
| <b>Tablo 14:</b> Tez Kapsamında Gerçekleştirilen Deneyler İlgili Standartlar .....                                                  | 48  |
| <b>Tablo 15:</b> Agregada Deneyleri Toplu Sonuçları .....                                                                           | 49  |
| <b>Tablo 16:</b> TS 802 (2016)'ye göre THB ve TOHB Üretiminde (Dmax:8mm) % Geçenler.....                                            | 51  |
| <b>Tablo 17:</b> THB Üretiminde 1 (bir) m <sup>3</sup> Karışım İçin Malzeme Miktarları, (kg/m <sup>3</sup> ).....                   | 52  |
| <b>Tablo 18:</b> BBT ile 1m <sup>3</sup> TOHB Karışım Oranları, (kg/m <sup>3</sup> ) .....                                          | 53  |
| <b>Tablo 19:</b> BBT'ye Ait Agregada Nem Düzenlemesi .....                                                                          | 54  |
| <b>Tablo 20:</b> Mikro Yapı Analizlerinin Gerçekleştirildiği Cihazlara Ait Bilgiler .....                                           | 61  |
| <b>Tablo 21:</b> Puzolanik Aktivite Testi.....                                                                                      | 63  |
| <b>Tablo 22:</b> BST, Perlit ve Pomza Agregada Deneyleri.....                                                                       | 64  |
| <b>Tablo 23:</b> BST, Perlit ve Pomza ve 400 Doz HB Üretimi .....                                                                   | 66  |
| <b>Tablo 24:</b> BBT, Perlit ve Pomza Agregada Deneyleri .....                                                                      | 67  |
| <b>Tablo 25:</b> BBT, Perlit ve Pomza ve 400 Doz HB Üretimi .....                                                                   | 69  |
| <b>Tablo 26:</b> Çimento Pastalarına Eklenen Akışkanlaştırıcıların Yayılma Değerleri.....                                           | 73  |
| <b>Tablo 27:</b> Ligninin Çimento Özelliklerine Etkisi .....                                                                        | 74  |
| <b>Tablo 28:</b> BBT ile THB Üretiminde Ligninin Optimum Katkı Oranının Belirlenmesi .....                                          | 74  |
| <b>Tablo 29:</b> BBT ve RBM'lerin TOHB Üretiminde Kullanımı .....                                                                   | 82  |
| <b>Tablo 30:</b> YBBT Agregalarının KDS'de 30 Gün Bekletildikten Sonra Üretilen THB'lerden Elde Edilen Sonuçlar .....               | 93  |
| <b>Tablo 31:</b> YBBT Agregalarının SDS'de 30 Gün Bekletildikten Sonra Üretilen THB'lerden Elde Edilen Sonuçlar .....               | 95  |
| <b>Tablo 32:</b> YBBT Agregalarının Suda 30 Gün Bekletildikten Sonra Üretilen THB'lerden Elde Edilen Sonuçlar.....                  | 96  |
| <b>Tablo 33:</b> KDS'de 30 Gün Bekletilen YBBT Agregaları ile Üretilmiş THB'lere Atmosferik Buhar Kürü Uygulamasının Sonuçları..... | 99  |
| <b>Tablo 34:</b> Katkıların YBBT Tozu İkame Edilerek Üretilen THB'lere Etkisi .....                                                 | 102 |
| <b>Tablo 35:</b> TOHB Üretiminde BBT'nin Çimento İkame Malzemesi Olarak Kullanılması ...                                            | 109 |
| <b>Tablo 36:</b> Bayburt Taşının Rezerv Miktarları .....                                                                            | 111 |
| <b>Tablo 37:</b> 1m <sup>3</sup> THB Üretiminin Maliyet Hesabı .....                                                                | 113 |
| <b>Tablo 38:</b> TOHB Üretiminin Maliyet Analizi .....                                                                              | 115 |

## ŞEKİLLER

|                                                                                                                            |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 1: Hafif Betonların BHA'larına Göre Sınıflandırılması .....                                                          | 5  |
| Şekil 2: Asidik ve Bazik Pomza Ait Görünüşler .....                                                                        | 8  |
| Şekil 3: Ham ve Genleştirilmiş Perlitin Görünümleri.....                                                                   | 9  |
| Şekil 4: Genleştirilmiş Kil Agregasına Ait Görüntüler.....                                                                 | 9  |
| Şekil 5: YFC'ye Ait Görünüşler .....                                                                                       | 10 |
| Şekil 6: Doğadaki Kireç Döngüsü.....                                                                                       | 12 |
| Şekil 7: Alçı Taşına Ait (Jips) Ait Görünüş .....                                                                          | 15 |
| Şekil 8: TS EN 197-1'e Göre Çimento Tipleri .....                                                                          | 17 |
| Şekil 9: Katkılı Çimentoların Katkı Adı ve Açılımı .....                                                                   | 18 |
| Şekil 10: C-S-H Jellerinin Oluşumu .....                                                                                   | 24 |
| Şekil 11: Erken Yaş C <sub>3</sub> S ve OPC Pastalarında CH'nin Değişimi.....                                              | 25 |
| Şekil 12: Literatürde Gözlenen Bazı Etringit Örnekleri .....                                                               | 25 |
| Şekil 13: Literatürde Gözlenen Bazı Afm Örnekleri .....                                                                    | 26 |
| Şekil 14: Bayburt İli Haritası ve Taş Rezervinden Görünüş.....                                                             | 29 |
| Şekil 15: BST'ye Ait Çeşitli Kullanım Alanlar .....                                                                        | 30 |
| Şekil 16: BBT'ye Ait Çeşitli Kullanım Alanları.....                                                                        | 30 |
| Şekil 17: Ligninin Kimyasal Yapısı.....                                                                                    | 31 |
| Şekil 18: RBM'lerin Şematik Olarak Genel Yapısı.....                                                                       | 33 |
| Şekil 19: Reaktif Boyanın Yapısı.....                                                                                      | 34 |
| Şekil 20: Erincan Perlit Madenine Ait Görünüş .....                                                                        | 41 |
| Şekil 21: Erzincan Pomzası Madenine Ait Görünüş.....                                                                       | 42 |
| Şekil 22: BST Agregalarına Ait Görünüm.....                                                                                | 44 |
| Şekil 23: BBT ve YBBT Agregaları .....                                                                                     | 45 |
| Şekil 24: Ligninin Yapısı .....                                                                                            | 47 |
| Şekil 25: HB Üretiminde Kullanılan RBM'ler.....                                                                            | 48 |
| Şekil 26: BT Agregalarının Hazırlanması.....                                                                               | 50 |
| Şekil 27: THB Kullanılan Agregaların Granülometri Eğrileri (D <sub>max</sub> :11,2mm, TS 802 ve Fuller Eğrisine Uyum)..... | 52 |
| Şekil 28: TOHB Üretiminde Kullanılan Agregaların Granülometri Eğrisi.....                                                  | 53 |
| Şekil 29: THB ve TOHB'lere Uygulanan Çökme Deneyi ve Aleti .....                                                           | 56 |
| Şekil 30: Sıkışık BHA Deneyi .....                                                                                         | 57 |
| Şekil 31: Kür Havuzunda Kür Edilen Numuneler .....                                                                         | 57 |
| Şekil 32: Basınç Dayanımı Ölçümü.....                                                                                      | 58 |
| Şekil 33: Betonun Eğilme Dayanımı Ölçümü.....                                                                              | 59 |
| Şekil 34: Atmosferik Buhar Kürü Uygulanan Cihaza Ait Resim .....                                                           | 59 |
| Şekil 35: Puzolanik Aktivite Deneyi ve Çimento Pastalarına Uygulanan Deney Cihazları ....                                  | 60 |
| Şekil 36: Katı Ligninin Elde Edilişi .....                                                                                 | 61 |
| Şekil 37: BST Agregası XRD Difraktogramı .....                                                                             | 65 |
| Şekil 38: BST'nin SEM Görüntüsü ve DTA Analizi .....                                                                       | 65 |
| Şekil 39: BST, Pomza ve Perlit Agregaları ile THB Üretimine Ait Grafik.....                                                | 66 |
| Şekil 40: BBT Agregasının XRD Difraktogramı.....                                                                           | 68 |
| Şekil 41: BBT Agregası SEM Mikrografları .....                                                                             | 68 |
| Şekil 42: BBT ile Üretilen THB'lerin 7, 28 ve 90 Gün Basınç Dayanımları .....                                              | 69 |

|                                                                                                                                                     |            |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>Şekil 43:</b> TOHB Üretiminde Farklı Agregaların Karşılaştırılması .....                                                                         | <b>70</b>  |
| <b>Şekil 44:</b> YBBT Agregasına Ait XRD Difraktogramı .....                                                                                        | <b>71</b>  |
| <b>Şekil 45:</b> YBBT Agregasına Ait SEM Görüntüleri.....                                                                                           | <b>71</b>  |
| <b>Şekil 46:</b> YBBT Agregasından çıkan Jele Ait XRD Difraktogramı .....                                                                           | <b>72</b>  |
| <b>Şekil 47:</b> YBBT, Pomza ve Perlit Agregaları ile THB Üretimi Karşılaştırması.....                                                              | <b>72</b>  |
| <b>Şekil 48:</b> Ligninin THB Üretimlerinde Optimum Katkı Oranının Belirlenmesi .....                                                               | <b>75</b>  |
| <b>Şekil 49:</b> Ligninin Katkılı THB'lerin Fiziksel Özellikleri .....                                                                              | <b>76</b>  |
| <b>Şekil 50:</b> Ligninin THB'lerde Sürüklediği Hava .....                                                                                          | <b>76</b>  |
| <b>Şekil 51:</b> Ligninin TOHB Basınç Dayanımına Etkisi.....                                                                                        | <b>77</b>  |
| <b>Şekil 52:</b> RBM4'ün THB ve TOHB Üretiminde Optimum Kullanım Oranının Tespiti .....                                                             | <b>78</b>  |
| <b>Şekil 53:</b> BBT Agregası ile Üretilen THB'lerin Mekanik Özellikleri .....                                                                      | <b>79</b>  |
| <b>Şekil 54:</b> RBM'lerin YBBT Agregası İle Üretilen THB'ye Etkisi .....                                                                           | <b>80</b>  |
| <b>Şekil 55:</b> RBM'ler ile Üretilen THB Numunelerinin Görüntüleri.....                                                                            | <b>81</b>  |
| <b>Şekil 56:</b> Su Kürü Uygulanan TOHB'lerin Basınç Dayanımı- BHA İlişkisi .....                                                                   | <b>82</b>  |
| <b>Şekil 57:</b> Hava Kürü Uygulanan TOHB'lerin Basınç Dayanımı, BHA İlişkisi .....                                                                 | <b>83</b>  |
| <b>Şekil 58:</b> BBT Agregalarının (Küp, 6x6x6cm) Mukavemetlerini Geliştirme Çalışmaları .....                                                      | <b>84</b>  |
| <b>Şekil 59:</b> BBT ve YBBT İçeren THB'lerin Mekanik Özellikleri .....                                                                             | <b>85</b>  |
| <b>Şekil 60:</b> KDS'de 30 Gün Bekletilen YBBT Agregalarına Ait EDS Analizi.....                                                                    | <b>86</b>  |
| <b>Şekil 61:</b> KDS'de 30 Gün Bekletilen YBBT Agregalarına Ait SEM Görüntüleri .....                                                               | <b>86</b>  |
| <b>Şekil 62:</b> KDS'de Bekletilen Agregalara Ait Termal Analiz Eğrileri.....                                                                       | <b>87</b>  |
| <b>Şekil 63:</b> 30 Gün SDS'de Bekletilen YBBT Agregalarına Ait XRD Analizi.....                                                                    | <b>88</b>  |
| <b>Şekil 64:</b> SDS'de Bekletilen YBBT Agregalarına Ait SEM Görüntüleri.....                                                                       | <b>88</b>  |
| <b>Şekil 65:</b> SDS'de Bekletilen YBBT'ye Ait TG-DTG-DTA Eğrileri.....                                                                             | <b>89</b>  |
| <b>Şekil 66:</b> 30 Gün Suda Bekletilen YBBT'ye Ait XRD Analizi.....                                                                                | <b>90</b>  |
| <b>Şekil 67:</b> 30 Gün Suda Bekletilen YBBT'ye Ait SEM Görüntüleri .....                                                                           | <b>90</b>  |
| <b>Şekil 68:</b> 30 Gün Suda Bekletilen YBBT'ye Ait TG-DTG-DTA Eğrileri.....                                                                        | <b>91</b>  |
| <b>Şekil 69:</b> 30 Gün KDS'de Bekletilen YBBT Agregaları ile Üretilen RBM1 Katkılı THB'lere<br>Ait XRD Analizi .....                               | <b>91</b>  |
| <b>Şekil 70:</b> 30 Gün KDS'de Bekletilen YBBT Agregaları ile Üretilen RBM1 Katkılı THB'lere<br>Ait TG-DTG-DTA Eğrileri.....                        | <b>92</b>  |
| <b>Şekil 71:</b> 30 Gün KDS'de Bekletilen YBBT Agregaları ile Üretilen RBM1 Katkılı THB'lere<br>Ait SEM Görüntüleri.....                            | <b>92</b>  |
| <b>Şekil 72:</b> 30 Gün KDS'de Bekletilen YBBT ile Üretilen THB'lere Ait Sonuçlar.....                                                              | <b>93</b>  |
| <b>Şekil 73:</b> 30 Gün Sodaya Doygun Suda Bekletilen YBBT Agregaları ile Üretilen Lignin Katkılı<br>THB'lere Ait EDS Analizi.....                  | <b>94</b>  |
| <b>Şekil 74:</b> 30 Gün Sodaya Doygun Suda Bekletilen YBBT Agregaları ile Üretilen Lignin Katkılı<br>THB'lere Ait SEM Görüntüleri .....             | <b>94</b>  |
| <b>Şekil 75:</b> SDS'de Bekletilen YBBT ile Üretilen THB'lere Ait Grafik.....                                                                       | <b>95</b>  |
| <b>Şekil 76:</b> 30 Gün Suda Bekletilen YBBT Agregaları ile Üretilen Lignin Katkılı THB'lere Ait<br>SEM Görüntüleri.....                            | <b>96</b>  |
| <b>Şekil 77:</b> 30 Gün Suda Bekletilen YBBT ile Üretilen THB'lere Ait Sonuç Grafiği .....                                                          | <b>97</b>  |
| <b>Şekil 78:</b> Lignin Katkısının İyileştirme Yapılan Agregalar ile Üretilen THB'lerdeki Etkisi ..                                                 | <b>98</b>  |
| <b>Şekil 79:</b> RBM1 Katkısının İyileştirme Yapılan Agregalar ile Üretilen THB'lerdeki Etkisi ..                                                   | <b>99</b>  |
| <b>Şekil 80:</b> KDS'de 30 Gün Bekletilen YBBT Agregaları ile Üretilmiş THB'lere Atmosferik<br>Buhar Kürü Uygulamasının Sonuçlarına Ait Grafik..... | <b>100</b> |

|                                                                                                          |            |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>Şekil 81:</b> İzopromil Alkol ile Hidrasyonu Durdurulan THB'lere Yapılan XRD ve SEM Görüntüleri ..... | <b>101</b> |
| <b>Şekil 82:</b> % 0-30 YBBT Tozu İkame Edilerek Üretilen 7 Günlük THB'lere Ait Sonuçlar...              | <b>103</b> |
| <b>Şekil 83:</b> % 0-30 YBBT Tozu İkame Edilerek Üretilen 28 Günlük THB'lere Ait Sonuçlar                | <b>104</b> |
| <b>Şekil 84:</b> % 0-30 YBBT Tozu İkame Edilerek Üretilen 90 Günlük THB'lere Ait Sonuçlar                | <b>104</b> |
| <b>Şekil 85:</b> İkame Oranının THB'lerin Dayanımlarına Etkisi (Katkısız) .....                          | <b>105</b> |
| <b>Şekil 86:</b> İkame Oranının THB'lerin Dayanımlarına Etkisi (SA Katkılı) .....                        | <b>106</b> |
| <b>Şekil 87:</b> İkame Oranının THB'lerin Dayanımlarına Etkisi (RBM1 Katkılı) .....                      | <b>106</b> |
| <b>Şekil 88:</b> İkame Oranının THB'lerin Dayanımlarına Etkisi (Lignin Katkılı) .....                    | <b>107</b> |
| <b>Şekil 89:</b> BBT İkamesi ile Üretilen TOHB'lerin Basınç Dayanımlarındaki Değişim .....               | <b>109</b> |
| <b>Şekil 90:</b> RBM1, SA ve Ligninin TOHB Üretimine Etkisi .....                                        | <b>110</b> |
| <b>Şekil 91:</b> Normal ve THB'lere Ait Birim Maliyet .....                                              | <b>114</b> |
| <b>Şekil 92:</b> BİMS ve TOHB'lere Ait Birim Maliyet .....                                               | <b>116</b> |



## KISALTMALAR

|                         |                                                       |
|-------------------------|-------------------------------------------------------|
| <b>ACI</b>              | : American Concrete Institute                         |
| <b>ASTM</b>             | : American Society for Testing and Materials          |
| <b>BBT</b>              | : Bayburt Beyaz Taşı                                  |
| <b>BST</b>              | : Bayburt Sarı Taşı                                   |
| <b>BT</b>               | : Bayburt Taşı                                        |
| <b>BUMER</b>            | : Bayburt Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı |
| <b>CaCO<sub>3</sub></b> | : Kalsiyum Karbonat (Kireç Taşı)                      |
| <b>CaO</b>              | : Kalsiyum Oksit                                      |
| <b>CaOH</b>             | : Kalsiyum Hidrooksit                                 |
| <b>CaSO<sub>4</sub></b> | : Kalsiyum Sülfat                                     |
| <b>CEM 1</b>            | : Portland Çimento                                    |
| <b>CEM 1I</b>           | : Portland Kompoze Çimento                            |
| <b>CEM 1II</b>          | :Yüksek Fırın Cürüflu Çimento                         |
| <b>CEM 1V</b>           | : Puzolanik Çimento                                   |
| <b>CEMV</b>             | : Kompoze Çimento                                     |
| <b>C-S-H</b>            | : Kalsiyum Silikat Hidrat                             |
| <b>DBHA</b>             | : Doygun Birim Hacim Ağırlık                          |
| <b>DTA</b>              | : Diferansiyel Termal Analiz                          |
| <b>EBYÜ</b>             | : Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi               |
| <b>EDS</b>              | : Enerji Dağıtıcı Spektroskopi                        |
| <b>GBHA</b>             | : Gevşek Birim Hacim Ağırlık                          |
| <b>GMA</b>              | : Genel Marn Agregası                                 |
| <b>KBHA</b>             | : Kuru Birim Hacim Ağırlık                            |
| <b>KDS</b>              | : Kirece Doygun Su                                    |
| <b>L</b>                | : Lignin                                              |
| <b>LC</b>               | : Lightweight Concrete                                |
| <b>MTA</b>              | : Maden Tetkik Arama Enstitüsü [MTA]                  |
| <b>PÇ</b>               | : Portland Çimentosu                                  |
| <b>PM</b>               | : Pomza                                               |
| <b>PR</b>               | : Perlit                                              |
| <b>RBM1</b>             | : Levafix Amber CA-N                                  |
| <b>RBM2</b>             | : Levafix Red CA                                      |
| <b>RBM3</b>             | : Levafix Blue CA                                     |
| <b>RBM4</b>             | : Remozal Brill Blue BB220                            |
| <b>Ref.</b>             | : Referans Seri                                       |
| <b>Ref. 1</b>           | : İyileştirme İşlemi Yapılan Agregalar                |
| <b>SBHA</b>             | : Sıkışık Birim Hacim Ağırlık                         |

|                        |                                         |
|------------------------|-----------------------------------------|
| <b>SD</b>              | : Silis Dumanı                          |
| <b>SDS</b>             | : Sodalı Su (Sodyum Karbonat)           |
| <b>SE</b>              | : Su Emme                               |
| <b>SEM</b>             | : Scanner Electron Microscopy           |
| <b>SiO<sub>2</sub></b> | : Silisyum Oksit                        |
| <b>TÇMB</b>            | : Türkiye Çimento Müstahsisleri Birliği |
| <b>THB</b>             | : Taşıyıcı Hafif Beton                  |
| <b>THBB</b>            | : Türkiye Hazır Beton Birliği           |
| <b>TOHB</b>            | : Taşıyıcı Olmayan Hafif Beton          |
| <b>T.Y.</b>            | : Tarih Yok                             |
| <b>USD</b>             | : Amerikan Doları                       |
| <b>XRD</b>             | : X Işını Kırınımı                      |
| <b>YBBT</b>            | : Yeşil Benekli Bayburt Beyaz Taşı      |
| <b>YFC</b>             | : Yüksek Fırın Cürüfu                   |

## SİMGELER

|                      |                       |
|----------------------|-----------------------|
| <b>BHA</b>           | : Birim Hacim Ağırlık |
| <b>MPa</b>           | : Mega Paskal         |
| <b>Eş.</b>           | : Eşitlik             |
| <b>m<sup>2</sup></b> | : Metrekare           |
| <b>m<sup>3</sup></b> | : Metreküp            |
| <b>µm</b>            | : Mikrometre          |

## GİRİŞ

Dünyada artan insan nüfusu, aynı zamanda insanların ihtiyaçlarının da her alanda artmasına neden olmakta ve bu durum hemen her alanda endüstrileşmeyi beraberinde getirmektedir. Endüstrileşmeye bağlı olarak oluşan yan ürünler ve endüstriyel atıklar; taşıma, depolama, vb. nedenlerden dolayı tehlikeli sayılabilecek boyutlarda çevre sorunlarına neden olmaktadır. Fabrikalarda işlenerek veya tüketilerek kullanılmış olan ham maddelerden kalan ve daha sonra herhangi bir biçimde işlenemeyen, her türlü metaller, yağlar, cüruflar vb. maden atıklarına endüstriyel atık adı verilmektedir. Katı atıklar; sahibinin istemediği, insan ve çevre sağlığı açısından güvenli bir şekilde bertaraf edilmesi gereken katı maddeleri ifade etmektedir. Evsel, ticari veya endüstriyel atık, kaynağına bakılmaksızın; hammadde, yakıt ve suyun kullanımı sonrasında kullanılabilirliğini yitirmesi ve mali değerini kaybetmesi olarak ifade edilebilir (Gündüzalp & Güven, 2016). Katı atıklar, üretildikleri zamandan son uzaklaştırma zamanına kadar çevre ve insanla doğrudan ya da dolaylı etkileşim içindedir. Ülkeler son yıllarda endüstriyel atıkların çevresel olumsuz etkilerinin azaltılabilmesine yönelik çalışmalara hız vermektedirler. Bu bağlamda, oluşan atıkların sınıflandırılarak depolanması, ayrıştırılması ve geri dönüşüme uygun atıkların geri dönüştürülmesi, geri dönüştürülmeye uygun olamayan endüstriyel atıkların değişik alanlarda değerlendirilmesi veya risk oluşturmayacak şekilde bertaraf edilmesine yönelik çalışmalar devam etmektedir. Ülkemizde çeşitli imalat sanayi atıkları, tarımsal ve evsel atıklar, organize sanayi atıkları ve özellikle termik santrallerde linyit kömürünün yakılması sonrasında ortaya çıkan uçucu kül gibi pek çok atık her yıl milyonlarca tonu bulmaktadır. Diğer bir endüstriyel atık olan silis dumanı, silisyum metalinin veya ferrosilisyum alaşımlarının üretiminde yan ürün olarak elde edilir. Her iki atık da çok ince taneli ve içeriğindeki yüksek oranda amorf silis içermesi nedeni ile çimento katkı maddesi olarak değerlendirilmektedir (Türkiye Çimento Müstahsisleri Birliği [TÇMB], 2007)

Son yıllarda Türkiye'nin değişik yerlerinde çıkarılan doğal taşların işlenmesi önemli bir ihracat kalemi oluşturmuş ve taş işlemeciliği endüstrisini ortaya çıkarmıştır. Bayburt yöresinde volkanizma sonucu oluşan Bayburt tüfleri; hafifliği, kolay işlenebilirliği ve doğal rengi sayesinde yöre için ciddi gelir kaynağı sağlamaktadır. Tüfün ocaklardan çıkarılıp işlenmesinden son ürün elde edilene kadar %50'lere varan oranda oluşmaktadır. Oluşan bu atıklar genellikle yol veya inşaat dolgu malzemesi olarak kullanılmakta veya çevredeki arazilerde depolanmaktadır. Atıl durumda bırakılan taş atıkları, çevre kirliliğine sebep olmakla birlikte rüzgarın etkisi ile yöredeki tarımsal üretimi de tehdit etmektedir. Bu atıklarının geri dönüşümüne yönelik literatürde az sayıda çalışma mevcuttur. Bu çalışmalar da; çok ince

öğütülmüş atıkların çimento katkı maddesi olarak kullanımına ve süperakışkanlaştırıcı eklenerek duvar yapı elamanı olarak değerlendirmesine yönelik çalışmalardır.

Diğer bir endüstriyel atık olan ve kağıt fabrikalarından yan ürün olarak ortaya çıkan lignin likörünün küçük bir kısmı aynı tesislerde yakıt olarak kullanılmakta kalan kısmı, ligninin çöktürme ve saflaştırma süreçlerinden sonra çimentolarda akışkanlaştırıcı / hava sürükleyici katkı maddesi olarak çeşitli lignosülfonat bileşiklerinin eldesinde kullanılmaktadır. Ancak çoğunluğu yine atık olarak çevreye deşarj edilmektedir.

Tekstil endüstrisinin en belirgin özellikleri, yüksek oranda organik ve inorganik kirliliğin yanı sıra yoğun renk içeriğe sahip atık sular üretmesidir. Tekstil endüstrisinde sayısı 10,000'in üzerinde boyar madde kullanılmakta ve dünyada her yıl yaklaşık 280,000 ton boyalı atıksu alıcı ortama deşarj edilmektedir (Mass & Chaudhari, 2005). Alıcı ortama verilen renkli su, ışık geçirgenliği ve fotosentez olayını olumsuz yönde etkilemekte, suda yaşayan organizmalarda birikerek toksik ve kanserojenik ürünlerin meydana gelme riskini artırmaktadır. Bu sebeple boyar madde içeren tekstil atıksuları, çevresel açıdan ciddi problemlere neden olmaktadır (Dokuzoğlu vd., 2008).

Tekstil fabrikalarında boyama işlemi için haslık özellikleri yüksek olduğu için en çok kullanılan reaktif boyar maddeler (RBM) en büyük kısmını oluşturmaktadır. Kimyasal yapılarında piyasada kullanılan akışkanlaştırıcılara benzer gruplar taşıması nedeniyle çimento katkı maddesi olarak değerlendirilmesine yönelik bir çalışma mevcuttur (Erdem vd., 2024). Ülkemiz topraklarının %93'ü ve nüfusumuzun %98'u deprem bölgelerinde yaşadığı bilinmektedir. Depremi hangi şekilde ve ne zaman meydana geleceği şu anki teknolojiye tespit edilememektedir. İnsanlar depremin tehlikeli etkilerinden korunabilmek için değişik önlemler almaktadırlar. Yapıların depremden daha az zarar görebilmeleri için depreme dayanıklı yapı tasarımı önemlidir. Yapı elemanlarının hafif ve depreme dayanıklı üretilmeleri sonucu yapının ölü yükü azaltılmış olacak ve depremin zararlı etkileri hafifletilecektir. Buna en iyi örnekler olarak dünyaca ünlü Pantheon Tapınağı (MS 125) ve ülkemizde bulunan Ayasofya Camii Kebiri (MS 532-537) gibi hafif yapı elemanları kullanılarak yapılan yapılar verilebilir ve bu günümüze kadar halen kullanımdadır.

Yapılarda kullanılan hafif beton (HB) birkaç yöntem ile yapılabilmektedir. Türkiye'de genellikle ekonomik olması, fazla bulunması ve kolaylığı gibi nedenlerle volkanizma ile oluşmuş pomza ve perlit hafif agregaları ile HB üretimi daha fazla tercih edilmektedir. Ülkemizde bulunan pomza rezervleri, 18 milyar m<sup>3</sup> ile dünya rezervlerinin %16'sına karşılık gelmektedir. Pomza düşük yoğunluğu ve yüksek boşluk oranından dolayı, ülkemizde daha çok hafif yapı elemanlarının üretiminde (bims briket ve blok eleman) kullanılmaktadır.

Perlit ve pomza içerdikleri yüksek reaktif silis nedeniyle puzolan olarak değerlendirildiği gibi tarım, kimya, gıda, tekstil gibi çok geniş kullanım alanına sahiptir. Perlitin Türkiye’deki görünür rezervi ise 57 milyon ton’dur ve dünya görünür rezervlerinin %8’ini oluşturmaktadır. Perlit madeninin maksimum tane boyutunun düşük olması (14 mm) ve yüksek ısıda genleşmesi, perlitin daha çok taşıyıcı olmayan hafif beton (TOHB) üretiminde ayrıca yalıtım amaçlı kullanımını öne çıkarmaktadır. Pomza ve perlit madenlerine olan ihtiyaç giderek artmasına bağlı olarak dünyanın ve ülkemizin rezervleri hızla azalmaktadır. Bu çalışmada; bir yandan atık tüflerin agrega özelliklerinin incelenmesi ve geliştirilmesi gerçekleştirilirken diğer yandan atık reaktif boyar maddelerden seçilen dört farklı boyanın ve lignin liköründen elde edilen atık ligninin taşıyıcı hafif beton (THB) ve TOHB üretiminde kullanımı amaçlandı. Bu şekilde kullanımla bir yandan atıkların oluşturduğu ciddi çevre problemlerinden kurtulunurken diğer yandan endüstriyel değerlendirme gerçekleştirilecek ve katma değer oluşturulacaktır.

## BİRİNCİ BÖLÜM

### 1. KURAMSAL ÇERÇEVE

Bu bölümde; hafif beton, beton katkı maddeleri, çimento, volkanik tüfler, kağıt fabrikaları atığı olan lignin ve tekstil fabrikaları atığı RBM'ler tanımlanmış ve endüstriyel değerlendirilmelerine ilişkin bilgiler verildi. Son olarak, bu atıkların endüstriyel değerlendirilmelerine ilişkin literatür araştırması yer almaktadır.

#### 1.1. HAFİF BETON

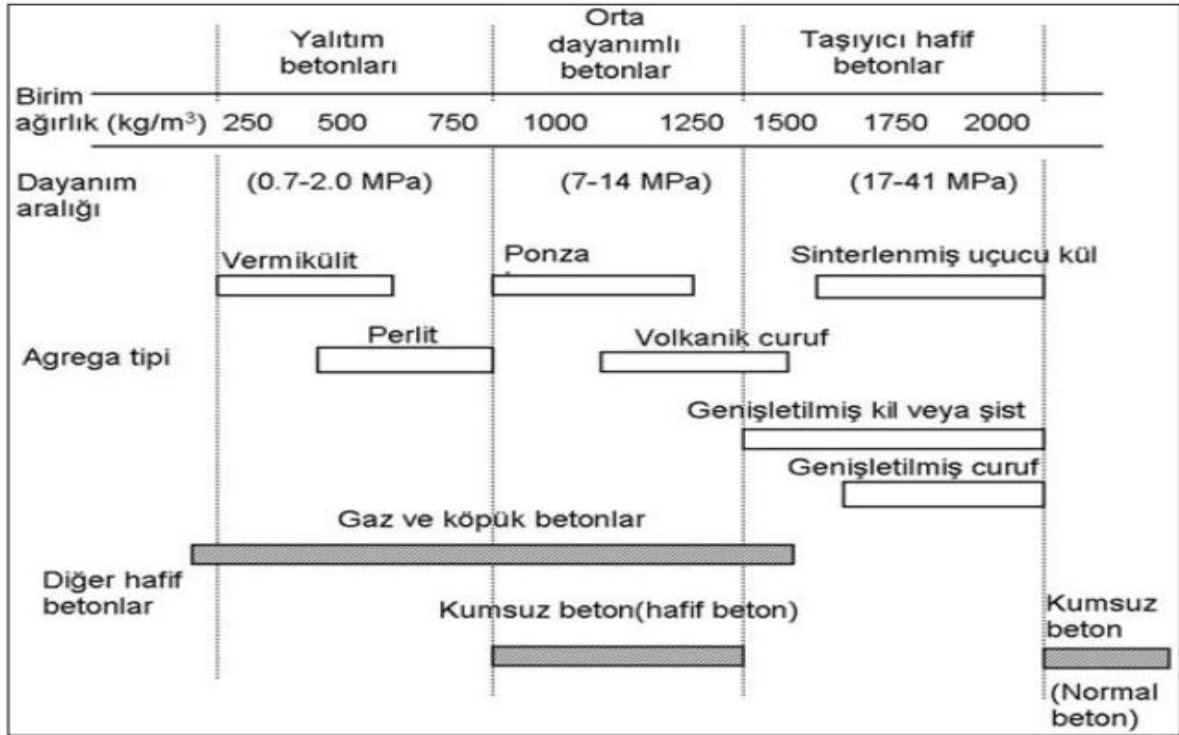
Hafif beton, betonun içerisinde değişik yöntemlerle boşluklar oluşturmak suretiyle Birim Hacim Ağırlığının (BHA) düşürülmesi ile elde edilebilmektedir. Genellikle betonun içerisine hava sürükleyerek, sadece iri agregaya kullanarak veya BHA değeri normal agregadan daha düşük agregaya kullanılarak hafif beton üretilmektedir. TS EN 206-1, BHA değeri 2000 kg/m<sup>3</sup>'ten daha düşük olan betonlar hafif beton olarak tanımlanmakta ayrıca hafif betonun BHA'nın 800-2000 kg /m<sup>3</sup> arasında olmasını şart koşmaktadır. Hafif betonların BHA değerleri 300-1800kg/m<sup>3</sup> arasında değişmekle birlikte 300 kg/m<sup>3</sup>'ten daha düşük BHA değerine sahip hafif betonlara çok hafif betonlar denilmektedir (Baradan vd., 2015). Amerikan Beton Enstitüsü (ACI) yapısal hafif betonu, minimum 17,2 MPa basınç dayanım veren ve 1350–1920 kg/m<sup>3</sup> BHA'na sahip beton olarak belirlemiştir (ACI 213R, 2014).

##### 1.1.1. Hafif Betonun (HB) Tarihi

HB 3000 yılı aşkın süreden beri kullanılmakta ve halen geliştirme çalışmaları devam etmektedir. HB'nin ilk kullanım yerlerinden biri M.S. 128 yılında İtalya'nın Roma kentinde, kubbesinin çapı 43 m olarak yapılmış olan Pantheon tapınağıdır. Daha sonraki zamanlarda birinci dünya savaşı sırasında Amerika Birleşik Devletleri donanmasında gemi yapımında ve ikinci dünya savaşı sırasında nakliye gemileri yapımında kullanıldı (Holm, 1980). 20. yüzyılın başlarında önemi anlaşılan hafif beton, daha sonra köprü kirişleri ve bina türü yapılarda da kullanılmıştır. Doğal hafif agregaların yanısıra genleştirilmiş kil agregaları üretilerek kullanılmış, daha stabil ve üniform hafif yapılar inşaa edilmiştir.

##### 1.1.2. Hafif Betonun Sınıflandırılması

HB'ler genellikle BHA değerleri ile dayanım özelliklerine göre sınıflandırılmaktadırlar. Şekil 1'de HB'lerin BHA ve dayanımlarına göre sınıflandırılması gösterilmektedir.



**Şekil 1:** Hafif Betonların BHA'larına Göre Sınıflandırılması (Mindess & Young, 1981)

#### 1.1.2.1. Yalıtım hafif betonu

BHA değerleri 300-800 kg/m<sup>3</sup> arasında olan ve basınç dayanımı 0,5-7 MPa arasında değişen değerlerdeki betonlara yalıtım HB'si denir. Bu betonların ısı iletim katsayı değerleri 0,30 W/Mk değerinden daha küçüktür (Neville, 1981).

#### 1.1.2.2. Yapısal olmayan hafif beton

Yapısal olmayan HB'lerin BHA değerleri 800-1400 kg/m<sup>3</sup> arasında ve basınç dayanımı 7-17 MPa arasında değişmektedir. Bu betonların ısı iletim katsayısı değeri 0,75 W/Mk değerinden daha küçüktür (Neville, 1981).

#### 1.1.2.3. Yapısal hafif beton

TS 2511'de BHA 1400-2000 kg/m<sup>3</sup> arasında olan ve yapıların taşıyıcı kısımlarında kullanım için yeterli dayanıma sahip olan betonlar hafif beton olarak tanımlanmaktadır. Amerikan Beton Enstitüsü (ACI 213R, 2014) yapısal hafif betonu, minimum 17,2 MPa basınç dayanım veren ve 1350 – 1900 kg/m<sup>3</sup> BHA'na sahip beton olarak belirlemiştir (Adhikary vd., 2022).

### **1.1.3. Hafif Beton Üretim Yöntemleri**

HB genellikle üç yöntemle elde edilebilir. Normal agregaya yerine BHA değeri daha düşük ve boşluklu agregalar kullanılarak üretim, betonun içerisine hava sürükleyerek üretim ve sadece iri agregaya kullanmak suretiyle hafif beton üretilebilmektedir. Bu yöntemlerden en kullanışlı ve uygun olan yöntem, normal agregaya yerine hafif agregaya kullanılmak suretiyle gerçekleştirilen üretim yöntemidir.

#### **1.1.3.1. Betonun içerisine hava sürükleyerek HB üretimi**

Bu yöntemde, beton içerisine fiziksel veya kimyasal yollarla stabil ve üniform boşluklar oluşturarak betonların BHA değerlerinin düşürülmesi sağlanmaktadır. Gaz ve köpük betonlarda büyük oranlarda birbirleriyle bağlantısı olmayan boşluklar bulunur ve boşluk hacmi tüm beton hacminin %60'ını oluşturabilir. Gaz ve köpük betonda iri agregaya olmayıp yalnızca kum kullanılmaktadır. Gaz betonlarda boşluklar, karışıma eklenen alüminyum, çinko ve magnezyum gibi metallerin tozları ile oluşmaktadır. Bu tozlar hidrasyon sonucu oluşan serbest kireçle reaksiyona girerek hidrojen gazının çıkmasına neden olmaktadır. Hidrojen gazı havaya karışmadığı için beton içinde boşluk oluşturarak hafif beton oluşumu gerçekleşir (Türkel, 2007). Beton içine hava sürüklemenin diğer yöntemi de beton karışımı esnasında su ile beraber hava sürükleyici kimyasal katkı kullanmaktır. Kullanılan bu katkı sayesinde beton içinde birbirinden bağımsız stabil ve üniform milyonlarca hava kabarcıkları oluşarak betonun BHA'sını düşürür. Çimento fabrikalarında çimento üretilirken çimentoya katılan katkıları ile de betonun içerisine hava sürüklenmektedir.

#### **1.1.3.2. Sadece kalın agregaya kullanarak HB üretimi**

Bu üretim tekniğinde, normal ağırlıklı betondan ince agreganın çıkarılması ile beton içeriğinde boşluklar elde edilememektedir. Bu yöntem ile üretilen HB'lere kumsuz hafif betonlar denilmektedir. Normal agregalı ve kumsuz hafif betonun birim hacim ağırlığı 1600 ile 2000 kg/m<sup>3</sup> arasında değişirken hafif agregalı ve kumsuz betonların birim hacim ağırlığı 650 kg/m<sup>3</sup>'e kadar düşebilmektedir. Kumsuz hafif betonların basınç dayanımları ise çimento dozajına bağlı olarak 5 ile 10 MPa arasında değişmektedir.

#### **1.1.3.3. Hafif agregaya kullanılarak HB üretimi**

Normal ve ağır agregalar kullanılarak üretilen betonların BHA değerleri genellikle 2,4 g/cm<sup>3</sup> değerini aşmaktadır. İlgili standartlar (TS 2511, TS EN 206) hafif betonun kuru BHA değerinin 2,0 g/cm<sup>3</sup> değerinden daha düşük olmasını şart koşmaktadır. Betonun %60-80'inin

agregadan olduğu bilindiğine göre betonun BHA değerinin düşürülmesinde en etkin ve uygulanabilir yöntemin agreganın yoğunluğunu azaltmak olduğu görülmektedir. Türkiye; Pomza, perlit, t f vb. volkanizmaya bağlı olarak oluşan hafif agregaya kaynakları bakımından zengin sayılabilir. Bu nedenle hem ekonomik hemde üretim kolaylığı bakımından hafif agregaya kullanılarak hafif beton üretim tekniği ile üretim diğer yöntemlere kıyasla çok daha fazladır.

#### **1.1.4. Hafif Agregalar**

TS 2511’de hafif agregaya, tane yoğunluğu  $2000 \text{ kg/m}^3$ ’  veya gevşek yığın yoğunluğu  $1200 \text{ kg/m}^3$ ’  aşmayan mineral kökenli agregaya olarak tanımlanmaktadır. Hafif agregalar iki şekilde elde edilebilir. Doğal elde edilen hafif agregalar: Pomza, perlit, t f, skorya, vermikülit ve şeyl gibi volkanizma sonucu oluştuğu için doğal hafif agregaya olarak nitelendirilebilir. Yapay hafif agregalar endüstriyel işlemlerden geçirilerek veya yan ürün olarak sonradan elde edilirler. Genleştirilmiş kil ve yüksek fırın cürufu yapay hafif agregalar olarak sınıflandırılmaktadırlar.

##### **1.1.4.1. Pomza (PM)**

PM, lavların bir volkandan p şk rmesinden sonra açık havada ani soğuması ile oluşur. Erimiş halde bulunan malzemedeki sıkışan gaz kabarcıkları lavların ani soğuması ile donar ve birbirinden bağımsız hava boşlukları oluşturarak pomzaya düşük yoğunluk, yüksek ısı ve ses geçirimsizliği kazandırır. Volkanik oluşumlarda asidik magma bazik magmaya nazaran daha viskoz olup yüksek miktarda (yaklaşık %70)  $\text{SiO}_2$  içerir. Bazik magmanın sıvı olduğu sıcaklıklarda asidik magma katı halde bulunur. Bu nedenle volkanik aktivitelerin durduğu zamanlarda magma akışı da durarak asidik kayaa ve kütleler oluşur (Gündüz vd., 1998). Basıncın artmasıyla asidik malzeme ile birlikte magmadaki erimiş gazlar patlayıp bacadan p şk rerek ani basınç serbestleşmesi ve ani genleşmeleri oluşturur. Bu sırada bünyede bulunan uçucu bileşenler ani olarak bünyeyi terkeder. Uçan bileşenleri takiben, arkada kalan erimiş küresel parçalar, atmosferle temas eder etmez hızla soğuyarak pomza oluşur. M  1. yüzyılda yaşamış Marcus Vitruvius’a ait ‘Mimarlık Hakkında On Kitap’ adlı belgede pomza taşının; sudan hafif, su emici, yüzücü ve hijyenik olduğundan bahsedilmektedir (Pomza Araştırma ve Uygulama Merkezi [PAUM], 2015). Demir  elik fabrikalarında yan ürün olarak elde edilen yüksek fırın cürufunun da oluşum süreci pomzanın oluşumuna benzemektedir. Poroz yapısından dolayı su emme özelliği yüksek ve BHA değeri düşüktür. Doğada asidik ve bazik olmak üzere iki çeşit pomza türü vardır (şekil 2). En fazla bulunan ve yaygın olarak kullanılan asidik pomza, kirli beyaz,  $0,5-1 \text{ gr/cm}^3$  arasında değişen yoğunluktadır. Sertliği Mohs skalasına göre yaklaşık 6 olan ve camsı doku gösteren volkanik bir madde olarak tanımlanmış ayrıca hafif yapı

elemanının boyutuna göre pomza taşı en büyük tane boyutunun 20 mm, 12,5 mm veya 10 mm olması gerektiği ön görülmüştür (TS 3224).



**Şekil 2:** Asidik ve Bazik Pomzaya ait Görünüşler (Çimen, 2020)

Bazik pomzanın diğer adı skorya olup daha koyu renkli, kahverengimsi, veya kırmızımsı renklindedir ve yoğunluğu 1-2 gr/cm<sup>3</sup>'tür. Roma, Bizans ve Osmanlı dönemlerinde tapınak ve termal yıkanma yeri yapımında kullanıldığı bilinmektedir. Anadolu'da kireç ve pomza tozu karışımından hafif Horasan harcı üretilerek yapılar inşaa edilmiştir. Son yıllarda pomzanın; ısı, ses ve yangın yalıtımı gibi özelliklerinden faydalanılarak başta inşaat sektöründe hafif yapı elemanı olmak üzere tekstil endüstrisinde taşlama, kimya endüstrisinde hijyen ve tarım alanlarını havalandırma gibi birçok sanayi kolunda kullanımı artmıştır.

#### **1.1.4.2. Perlit (PR)**

PR, uygun sıcaklıkta hızlı ısıtıldığında çok hafif ve gözenekli bir hâl alan, inci parlaklığında, asidik volkanik camdır. Perlit ismi, inci anlamına gelen 'perle' kelimesinden türetilmiştir. Özgül ağırlığı 2,2 - 2,4 g/cm<sup>3</sup> arasında değişen ham perlit, 750 ile 1100°C arasında bir sıcaklığa anî olarak ısıtılınca, içindeki suyun buhar halinde çıkmasıyla mısır gibi patlayarak, hacmi 5 ile 30 misli artar, geriye çok gözenekli ve hafif bir cam kalır. Böyle genleştirilmiş perlit, inşaata, sanayide ve ziraatte kullanılmaktadır. PR, %5 ile %9 arasında su ihtiva eder. Perlitteki suyun bir kısmı gevşek bağlanmış olup, 350°C civarında çıkar. Geri kalan % 1,2 kadar su sıkı bağlanmış olup, ancak 750-1100°C arasında uzaklaşır. PR; ucuzluğu, hafifliği, ısı ve ses izolasyonu bakımlarından hafif yapı malzemesi üretiminde sıkça kullanılmaktadır. 1 mm'den küçük, gevşek birim hacim ağırlığı 0,12 ile 0,24 g/cm<sup>3</sup> olan perlitler sıvada kullanılır. Alçıya kum yerine perlit karıştırılarak yapılan sıvalar daha hafif, çok daha iyi ısı ve ses izolasyonu sağlar (Orhun, 1969). Perlit izolasyonu bakteri barındırmaz, çürümez, hava

geçirimli ve uzun ömürlü olduğu için beton, briket, izolasyon, filtreleme, tarım da gübreleme vb alanlarda sıklıkla kullanılmaktadır. Şekil 3'te ham ve genleştirilmiş perlit gösterilmektedir.

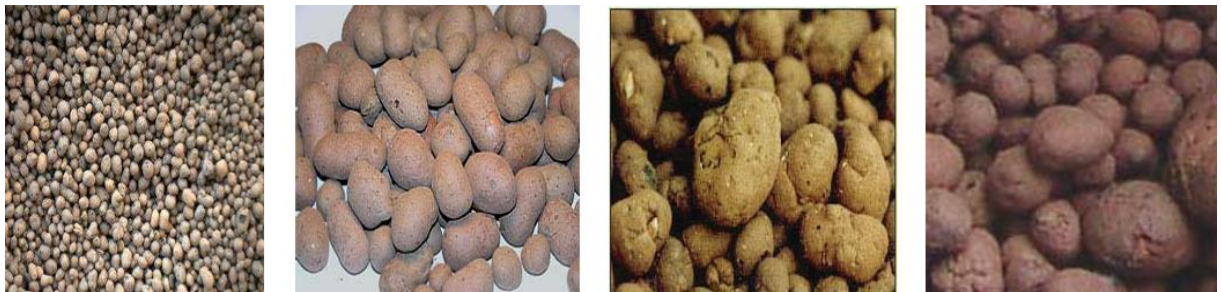


**Şekil 3:** Ham ve Genleştirilmiş Perlite Ait Görünüşler

#### 1.1.4.3. Genleştirilmiş kil

Sinterleşme süreci çabuk ve 1100-1300°C dereceler arasında oluşan granüller poroz seramik ürünleri olup homojen, kapalı ve küçük boşluklar halinde hücreler içerirler ve hacimleri artar. Kil, killi şist ve şeyllere genleşen killeri adı verilmektedir (Devlet Planlama Teşkilatı [DPT], 2005). Genleştirilmiş kil agregası hafif agregalardan basınç mukavemeti en yüksek olanlarından biridir. Genleştirilmiş kilin hafif olması, yüksek dayanımlı ve ısı izolasyonu sağlaması en önemli özellikleridir (Gündüz vd., 2006). Yapılarda genleştirilmiş kil agregası kullanıldığında yapının ağırlığı azalacağı için yapıya gelen deprem kuvvetleri de azalacaktır.

Vijayalakshmi ve Ramanagopal (2018) yaptıkları çalışmada, genleştirilmiş kil agregası ile yapısal beton üretmişler ve bu agregaların özgül ağırlığının normal agregalardan %16-46 daha düşük ve su emme özelliklerinin daha fazla olduğunu tespit etmişlerdir. Genleştirilmiş kil agregalı betonla üretilen betonun, 28 günlük basınç dayanımının 23-60 MPa aralığında değiştiğini ayrıca BHA değerlerinin 1290-2044 kg/m<sup>3</sup> aralığında olduğunu bulmuşlardır. Şekil 4'te genleştirilmiş kil agregasına ait görünüş verilmiştir.



**Şekil 4:** Değişik Boyutlardaki Genleştirilmiş Kil Agregası (Gündüz, 2006)

#### 1.1.4.4. Yüksek fırın cürufu (YFC)

Cüruf, metallerin veya metal içeren cevherlerin, yüksek fırınlarda eritildikten sonra oksitler ve silikatlardan meydana gelen ayrıca metalden hafif olduğu için yoğunluk farkı ile yüzeyde biriken bir yan üründür (Ünal vd., 2014). Demir cevherinin “yüksek fırın” olarak adlandırılan fırınlarda, çok yüksek sıcaklıklara kadar (yaklaşık 1600°C) ısıtılarak oksijenden ve yabancı maddelerden arındırılmaları ile demir elde edilmektedir. YFC, yüksek fırından eriyik olarak yaklaşık 1500°C sıcaklıkta, atık olarak dışarı alınır. Amorf bir yapıya sahip olan YFC’nin silis oranı yüksektir. Soğutulduktan sonra silis ve alümin miktarı fazla olduğu için çok ince (ort. 30µm) öğütüldükten sonra çimento katkı maddesi olarak (CEM III) kullanılmaktadır. YFC ile üretilen betonda, hidrasyon ısısının düşük olması, sıcak havalarda ve kütle betonlarda faydalıdır. Ayrıca betonun sülfat direncini artırarak, klor geçirgenliğini azaltır ve korozyona karşı donatıyı korur (Onat, 1998).

YFC, İngiltere Ulusal Mevzuatında ve Avrupa Birliğinde endüstriyel yan ürün olarak değerlendirilmektedir. Avrupa Birliği ve gelişmiş ülkelerde, demir-çelik cüruflarının devletlerin ekonomisine yeniden kazandırılması için yasal düzenlemeler kolaylaştırılmaktadır (Türkiye Teknoloji Geliştirme Vakfı, [TTGV], 2012). Şekil 5’te YFC agregaları görülmektedir.



Şekil 5: YFC ( Kim & Park, 2016)

#### 1.1.4.5. Volkanik tüf (Bayburt taşı/tüfü)

Yanardağlardan püsküren külün, kumun ve lav parçacıklarının çökmesi ile çoğunlukla açık renkli, hafif gözenekli bir tür çökelti taşı özelliğindeki tabakalı kayalara tüf denilmektedir. Tüfler, yanardağ lavlarının diğer volkanik kalıntılarla beraber katılaşması ya da birlikte sıkışmasıyla oluşan ve gözenekli kayaç özelliğindeki yapılardır (Helvacı & Alaca, 1991). Genellikle volkanik dağların yamaç ve eteklerinde tabakalar halinde bulunurlar ve oluştuğu kayaçların özelliğine göre riolit, bazalt tüfü olarak adlandırılırlar. Yarısından daha fazla tüf

ihativa eden kayalar tüflü kayalar olarak adlandırılmaktadır. Tüfler kısaca, tortul veya magmatik kayalar olarak iki farklı sınıfta değerlendirilebilir. Volkan püskürmesi ile lavların büyük parçalarının kraterden fırladıktan sonra havada katılaşması ile oluşan kayalardır (Yıldız & Kuşçu, 2001). BT'nin vitrik karakterli bazı kesimlerinin yoğun ayrışması sonucu buralarda zeolit olmuşmuştur. Bayburt tüfitleri bu kesimlerde %86'ya varan oranlarda klinoptilolit türü zeolit mineraline dönüşmüştür (Cicerale, 2015).

## **1.2. İLK BAĞLAYICILAR VE ÇİMENTO**

Bağlayıcı malzeme daha genel olarak çimentolama malzemesi, mineral parçaların sıkı bir bütün halinde birbirine bağlama yeteneğine sahip malzeme olarak tanımlanmaktadır. Yapısal amaçlı kullanılan çimento teriminin anlamı; ince ve iri agregayı ve blok yapı taşlarını birbirine bağlayan malzeme olarak tanımlanmaktadır (Neville, 1981).

### **1.2.1. Tarihte Kullanılan İlk Bağlayıcılar ve Çimentonun Tarihi**

Çok ince öğütüldükten sonra (ort. 2-30 $\mu$ m), üzerine su eklenmesi ile önce plastik hamur haline gelen, daha sonra zamanla plastikliğini kaybedip katılaşarak sertleşen ve bağlayıcı özellik gösteren malzemelere bağlayıcı malzemeler denir.

İlk çağlarda doğal taş, kerpiç ve tuğla ile yapılan yapılarda bağlayıcı olarak kil esaslı çamur kullanılırken daha sonra, Prehistorik devirde (11000 yıl önce) alçı ve kireç bağlayıcı olarak kullanılmıştır. Bu zamanlarda yakılan ateşler ile 400°C ~ 800°C'ın üstüne çıkılamadığı için iyi kireç elde edilememiştir. Alçının daha düşük ısıda (190°C'de) elde edilmesinden dolayı daha çok fazla kullanılmıştır. Eski Mısır'ın Sakkara ve Keops piramitlerinin derzlerinde dolgu maddesi olarak alçı harcı kullanılmıştır (Finch, 1954). Anadolu'da Çatalhöyük'te 1m×1m×0,5m ebatlarında alçıdan yapılmış duvar süsleri ve sandık bulunmuştur. Ayrıca günümüzden 3400 yıl kadar önce Mısır firavunu Amenhotep II'nin yaptırdığı Karnak Tapınağı taşları anhidrit alçı ile yerleştirilmiştir, aynı yıllarda Girit'te yapılan Knossos Sarayı'nda da anhidrit alçı kullanılmıştır (Straub, 1964). Çok eski zamanlardan beri harçların işlenmesini, dayanım ve dayanıklılığını artırmak için harca; kan, yumurta, peynir ve reçine gibi organik maddeler ekledikleri gibi pişmiş topraktan imal edilen tuğla ve kiremit atıklarından elde edilen toz haldeki inorganik maddeleri de eklemişlerdi. Bu maddelerden bazıları sertleşmeyi sağlamak, bazıları sertleşmeyi geciktirmek, bazıları ise sertleşmeden sonra dayanımı artırmak için kullanılmıştır. Bazı zamanlarda insanlar harçlara; saman, bitki lifleri, hayvan kılları, insan saçını katarak harçların dayanım ve dayanıklılıkları artırılmıştır.

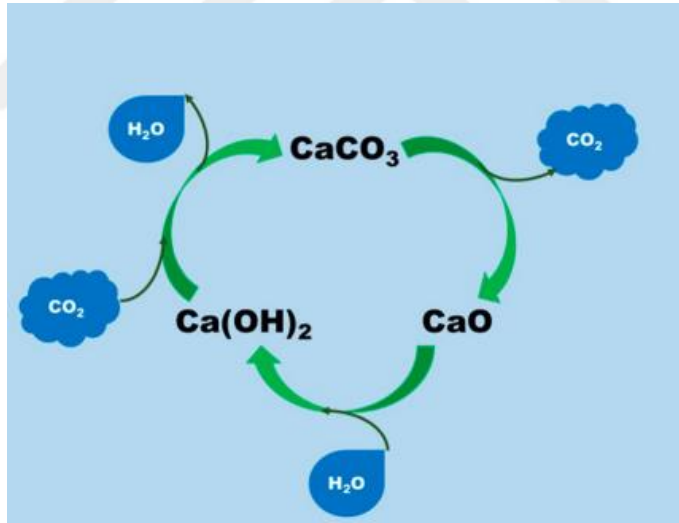
### 1.2.1.1. Kireç

İçeriğinde en az %90 oranında kalsiyum karbonat ( $\text{CaCO}_3$ ) içeren kireç taşının 850-1450°C’de yakılması ile kalsinasyon sonucu elde edilen beyaz maddeye sönmemiş kireç ( $\text{CaO}$ ) denir. Kireçtaşı ( $\text{CaCO}_3$ ) tabiatta bulunan en önemli kalsiyum bileşiğidir.  $\text{CaO}$ ’nun su ile temasından sonra elde edilen ve beyaz bir kaymak görünümündeki maddeye sönmüş kireç [ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ] denir. Sönmüş kirecin su ve kumla karıştırılması ile kireç harcı yapıldığı gibi sadece su ile karıştırılması ile badana harcı olarak da kullanılabilir. Hava kireci; Eski Babil, Mısır, Hitit, Finike ve Persler tarafından yapıda bağlayıcı madde olarak kullanılmıştır. Romalılar devrinde su kireci bulunmuş ve su içerisindeki inşaatlarda kullanılmıştır. Türkler puzolanik kirece (volkanik esaslı, killi, kalkerli toprak) tuğla kırıklarını öğütürerek karıştırmış ve Horasan harcı adı altında kullanmışlardır (Mavioğlu, 2011). Hava ve su (hidrolik) kireci olmak üzere iki çeşit kireç vardır. Şekil 6’da doğadaki kireç döngüsü gösterilmektedir.

$\text{CaCO}_3 + (\text{ısı}) \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$  [kireç taşının ısı alarak sönmemiş kirece dönüşümü]

$\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca}(\text{OH})_2$  [sönmemiş kirece suyun teması ile sönmüş kireç oluşumu]

$\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$  [sönmüş kirece, havanın karbondioksiti teması ile tekrar kireç taşı oluşumu]



Şekil 6: Doğadaki Kireç Döngüsü (Campo vd., 2021)

#### Su kireci (hidrolik kireç)

Sönmemiş kirece su katılarak söndürülmesi gerekir ve bu söndürme işleminde sırasında ısı ve buhar açığa çıkar. Sönmemiş kireç ( $\text{CaO}$ ) ancak söndürüldükten sonra sönmüş kireç olarak kullanılabilir. Hidrolik kireç, içeriğinde %10-25 oranında kil bulunduran kalker taşının pişirilmesiyle elde edilir. Doğal hidrolik kirecin üretimi sırasında, içeriğinde kil barındıran kireç taşı ısıtıldığı zaman, yüksek sıcaklıklarda silika-kireç reaksiyonu ile di kalsiyum silikat ( $\text{C}_2\text{S}$ )

oluşur. Di-kalsiyum silikatlar su ile hidrate kalsiyum silikat (C-S-H) oluşur (Kozlu, 2010). Suda söndürülüp toz haline getirebilmek için kirecin içeriğinde en az %10 oranında CaO bulundurması gerekir. Bu şekilde elde edilen kireç, suda çözünmez ve katılaşıp sertleşerek su yapılarında kullanılabilir. Hidrolik kireçler silis ve alüminyum içerikli marnlı taşların ateş ile tepkimesi sonucu oluşur ve dayanımı hava kirecine göre oldukça yüksektir (Şimşek, 2021).

### **Hava kireci**

İçindeki kil miktarına bağlı olarak yalnız havanın karbondioksiti ile katılma özelliği gösteren kireç türüne hava kireci denilmektedir. Yapıda kullanılan kireçler, hava kireci türünden olup kireç sözcüğünün kullanımı yaygın anlamıyla hava kirecini ifade etmektedir (Bulut, 2007).

### **Kirecin özellikleri ve kullanım alanları**

Ucuz ve kolay bulunabilir bir malzeme olan kireç; nötralizasyon, absorpsiyon, vb. kimyasal süreçlerin ana girdisidir. Kimyasallar ile hızlı şekilde reaksiyona girerek istenmeyen maddeleri bünyeden uzaklaştırabilmektedir. Harç yapımında, gaz beton yapımında bağlayıcı, çevresel arıtmalarda kimyasal madde olarak, toprak stabilizasyonunda, yol ve zemin stabilizasyonunda ayrıca asfalt yapımında aşınmaya karşı katkı maddesi olması, kirecin yaygın olarak kullanılan alanlarından (MTA, Kireç).

Sönmüş sulu kireç, suyun pH'ını nötrleştirir ve dolayısıyla ana hat boruların asitle aşınmasını azaltarak korozyonu önler. Aşırı miktarlarda karbon dioksit (karbonik asit) içeren atık sular, alt yapılardaki beton borulara zarar verirler. Bu borulardaki sönmüş kireç ile dışarıdan gelen CO<sub>2</sub> reaksiyona girererek karbonatlaşma oluşturmak sureti ile borularının içinde koruyucu bir tabaka oluşur.

### **Kirecin faydaları**

Gazbeton, düşük yoğunluğu ve iyi mukavemet özelliklerinin yanında (basınç day:2,5-10 MPa) yapılarda çok iyi ısı ve ses yalıtımı sağlar. Gaz beton üretim sürecinde sönen kireç, açığa çıkardığı ısı ile alüminyum tozlarıyla tepkimeye girer ve hidrojen gazı açığa çıkarak gözenekli yapı oluşumuna katkı sağlar (Kızılkaya & Sarıcı, 2020). Ayrıca, buhar kürü sırasında ortamda bulunan SiO<sub>2</sub> ile reaksiyona giren kireç, tobermorite (C-S-H) kristalleri oluşturarak ürünün mukavemetini artırır (Kireç. org, t.y.). Kireç, ortamın pH'ını 12,4 civarında tutarak bazik bir ortam oluşturarak donatının korozyona uğramasını önler.

İnşaatta kireç “bağlayıcı madde” olarak kullanılır. Özellikle deprem bölgelerinde, kireç bir binanın belirli bir gerilime dayanmasını sağlar. Kireç harçları esnek olduğu için kendi

kendini onarabilir. Bu, bir binanın/yapının gerilme altındaki deformasyonunu onaracak anlamına gelir. Kireç harcı suya karşı bir bariyer ve ortamın nemini emerek nem geçişi kolay olacak ve tuz ile nem birikmesi yapıya zarar veremeyecektir (Swolfs & Goeminne, 2008).

Kireç, atmosferdeki karbondioksit ile reaksiyona girerek bağlayıcı özellik kazanan kalsiyum karbonat oluşturur. Bu reaksiyona karbonasyon denir. Bu nedenle, kirecin bağlayıcı etkisi karbonasyon hızına bağlıdır. Hidrolik kireç, içerisinde reaktif silika (Puzolan) bulunan veya ilave edilen, CO<sub>2</sub>'ye ihtiyaç duymadan puzolanik aktivite ile su altında kalabilen kireçtir (Ranka, 2022).

### 1.2.1.2. Alçı

Alçıtaşı, kimyasal bileşimi kalsiyum sülfat (CaSO<sub>4</sub>.2H<sub>2</sub>O) olan bir mineraldir. Alçının hammaddesi, doğada alçıtaşı olarak bilinen tek mineralli tortul taş anhidrit olan jipstir. Yarım hidrat kalsiyum sülfat olarak tanımlanan alçı, doğada jips olarak adlandırılan iki molekül suya sahip kalsiyum sülfatın, 180-250°C civarında kızdırılması ile elde edilir. Bu reaksiyona uzaklaştırılması yani 'dehidratasyon' denir. Alçı, kireçten daha önce kullanılmış özellikle karasal iklime sahip ülkelerde harç yapımında bağlayıcı olarak kullanılmıştır. Daha sonraki dönemlerde camilerde, medreselerde, hamamlarda ve türbelerde kaplama ve süs malzemesi üretiminde kullanılmıştır. Alçı hafiftir (BHA: 0,6 - 1,20 kg/m<sup>3</sup>), su ve nemden uzak mekânların iç sıvalarında kullanılabilir. Alçının ısı iletkenlik değeri, birim ağırlığına bağlı olmak üzere 0,29-0,53 W/mK arasında değişmektedir (Gürdal, 2010).

Isı yalıtımı, termal enerji depolama, iç mekân sıcaklıklarının düzenlenmesi, bina enerji tüketiminin azaltılması ve CO<sub>2</sub> emisyonlarının hafifletilmesi işlevlerine sahip alçı esaslı yapı malzemelerinin üretilmesi önemlidir (Liao vd., 2024). Ayrıca çimento üretim aşamasında priz düzenleyici olarak çimentoya (%5 oranında) katılır. Alçıdan üretilmiş malzeme yanmaz, alçının yanmaz oluşu, ısı yalıtım ve ses yalıtım özelliklerinin iyi olması, hafif olması ve nem dengeleyici olması gibi özelliklerinden dolayı günümüzde geniş kullanım alanlarına sahiptir. Sahip olduğu bu geniş kullanım alanlarının en başında inşaat alanında onarım, duvar dolgusu olarak kullanılmaktadır. İnşaat sektöründe sıva alçısı, kartonpiyer alçı, saten perdah alçısı ve makine sıva alçısı olarak kullanımı yaygındır (Arnavutoğlu, 2024). Şekil 7'de alçı taşı (jips)'e ait görsel verilmiştir.



**Şekil 7:** Alçı Taşı, Jips (Kalkan & Gündüz, 2023)

### **1.2.2. Çimentonun Tanımı ve Hammadeleri**

Latince “bağlayıcı” anlamına gelen “Caementum”, İngilizce’de cement, İtalyanca’da cemento şeklinde kullanılmıştır. Türkçe’de ise telaffuz benzerliğinden dolayı, İtalyanca “Cemento” sözcüğünden gelen “çimento” sözcüğü kullanılmaktadır.

Hidrolik bir bağlayıcı (suda çözünmeden sertleşebilen) olarak tanımlanan çimento, su ile etkileşiminde hidrasyon gerçekleşmekte ve kimyasal reaksiyon sonucu ısı açığa çıkarak bağlayıcılık özellik kazanmaktadır. Çimentonun %65–80’i kalsiyum karbonat ( $\text{CaCO}_3$ ) ve geri kalan kısmı  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ve  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ’ten oluşmaktadır. Kalker ve kil karışımının birlikte öğütülerek  $1400 - 1500^\circ\text{C}$ ’ de sıcaklıkta pişirilmesinden klinker elde edilir. Klinkerin %5 alçı ile beraber ortalama 30 mikron incelikte öğütülmesi ile çimento elde edilir (Kökipek, 2010). Marn doğal olarak %35-85 kalker ve %30-50 kilden oluştuğu için çimento hammaddesi olarak kullanılabilir (Akgün, 2019; Danner vd., 2012; Justnes vd., 2011).

#### **1.2.2.1. Kalker (Kireç taşı)**

Yapısında yaklaşık %90 kalsiyum karbonat ( $\text{CaCO}_3$ ) içeren kayalara kalker diğer adı ile kireçtaşı denir. Okyanus ya da deniz havzalarında erimiş kireçlerin dibe çökmesiyle taş dönüşerek kalker oluşur. Kalkerin mohs skalasındaki sertlik derecesi 3, yoğunluğu  $2,5 - 2,7 \text{ gr/cm}^3$  arasında değişmektedir. Yeraltı sularında traverten olarak, deniz ve tatlı sularda ise kimyasal, organik veya mekanik çökeltme sonucu kalker (kireçtaşı) yatakları oluşur (Kökipek, 2010). Kireç taşları, günümüzde en fazla çimento ve beton üretiminde kullanılır. Kireç taşının iki ayrı kristal şekli, Kalsit ve Aragonit’ dir ve bileşiminde %56 CaO ve %44  $\text{CO}_2$  ihtiva ederler. Kalsit, rhombohedral yapıdadır ve sertliği Mohs ölçeğinde 3 olmasına karşın,  $400^\circ\text{C}$ ’ de kalsite

dönüşen Aragonit' in kristal yapısı orthorhombik ve sertliği Mohs ölçeğinde 3,5-4'e karşılık gelmektedir (Maden Tetkik Arama Enstitüsü [MTA], 11.08.2025).

#### **1.2.2.2. Kil**

Kil, bileşiminde alüminyum ve silika bulunduran, tane boyutu 0,002 mm'den (2 µm) daha düşük sulu ortamda plastik, fırınlandığı zaman sertleşen toprağın en küçük fraksiyonu olan bir malzemedir (Güngör, 1981). Killer kimyasal analizlerde; silika, alümina, su ve bunlarla birlikte demir, alkali ve toprak alkalileri içerirler. Bazı killer kil minerali olmayan kuvars, kalsit, feldispat, prit, dolomit, opal, kristobalit gibi mineralleri ve amorf maddeleri de içerebilir. Killeri kayalardan ayıran en önemli özellik, killerin çok küçük kristallerden meydana gelmiş olmalarıdır. En az bir boyutu geniş yüzey alanlarına sahiptir. Fiziksel olarak yüksek adsorbsiyon özelliğine sahiptirler. Bazı killer yüzeylerinde negatif yüklere sahiptirler (İşçi, 2002).

#### **1.2.2.3. Marn (GMA)**

Marn, kalsiyum karbonat ve kilden oluşmaktadır. Bileşiminde %30-50 arası kalsiyum karbonat içeren marnlara Kil Marn'ı, yapısında %50-70 aralığında kalsiyum karbonat bulunduran marnlara ise Kireç Marn'ı adı verilmektedir. Bileşiminde %30 kil, %70 oranında kalker barındıran ya da bu yapıya benzer nitelikler taşıyan marnlar çimentonun hammaddesini oluşturan önemli bir madendir. Marnlı kalkere Amerikan Rock ve Doğal Çimento Kayası'da denilmektedir. Marn, içeriğinde kalker ve kili homojen şekilde bulundurduğu için ve daha kolay öğütülebildiğinden dolayı çimento üretiminde hammadde olarak kullanılması için elverişlidir (Usta, 2019).

#### **1.2.3. Çimento Üretimi**

Dünyadaki CO<sub>2</sub> üretiminin yaklaşık %8'i çimento üretimi aşamalarından kaynaklandığı bilinmektedir. Bu nedenle çimento üretim aşamaları son derece önem arz etmektedir. Portland Çimentosu (PÇ) klinkeri üretim süreci sırası ile; hammaddenin temini [%75 Kalker (CaCO<sub>3</sub>) ve %25 Kil (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)], kırma, öğütme, karıştırma (farin; yaş, kuru, yarı kuru), varsa katkılarla birlikte öğütme ve pişirme (1450-1650°C) aşamalarından oluşmaktadır. Oluşan 1-3cm koyu gri renkli, prüzlü ürüne klinker adı verilir. Klinker, 1-100 mikrometre (ortalama 30µ) öğütüldükten sonra bağlayıcılık özelliği kazanmaktadırlar. Klinkerin öğütülmesinden sonra çimento tanacıklarının su ile teması sırasında çok hızlı priz oluşacağı için betonun taşıma ve işlenebilirliği güç olmaktadır. Prizi geciktirmek için klinkerin öğütülmesi aşamasında klinkerin

ağırlığının %3-6'sı oranında alçı ( $\text{CaSO}_4$ ) katılmaktadır. Katkılı çimento üretiminde kullanılan katkıları bu aşamada çimentoya katılmaktadır.

#### 1.2.4. Çimento Çeşitleri

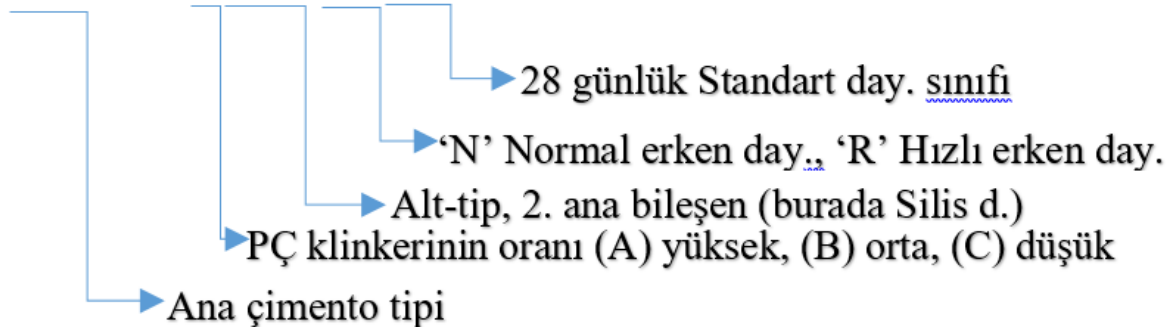
Avrupa'da ve ülkemizde genel kullanım çimentolarını sınıflandıran ve özelliklerini belirleyen TS EN 197-1 standardıdır. CEM çimentosu, hidrolik bağlayıcı olarak su içerisinde sertleşmesi için öncelikle kalsiyum silikatların hidrasyonu sonucu oluşan ve içindeki reaktif  $\text{CaO}$  ve reaktif  $\text{SiO}_2$  toplamının kütleye en az %50 olması gereken çimentodur. CEM çimentosu kütleye en az 2/3 oranında kalsiyum silikat içermeli,  $\text{CaO/SiO}_2$  oranı 2,0'den az olmamalıdır. TS EN 197-1'de genel amaçlı çimentolar (CEM çimentoları) 5 ana tip olarak; CEM I Portland Çimentosu, CEM II Portland Kompoze Çimento, CEM III Yüksek Fırın Cürüflü Çimento, CEM IV Puzolanik Çimento, CEM V Kompoze Çimento belirlendi. Şekil 8'de TS EN 197-1'e göre çimento tipleri ve katkı oranları, Şekil 9'da katkılı çimentoların katkı adı ve açılımı verildi. Çimentoların 28 günlük basınç dayanımları TS EN 197-1'de 32,5, 42,5 ve 52,5 MPa olarak ifade edilir. TS EN 197-1 standardına göre çimento çeşitleri Şekil 8'de verilmiştir (Akan, 2019).

| Çimento Tipi | Adı                               | Notasyon    | Ana Bileşenler (Kütleye % olarak) |                       |                   |                 |                       |                      |                     |               |                       |                        | Minör İlave Bileşenler |
|--------------|-----------------------------------|-------------|-----------------------------------|-----------------------|-------------------|-----------------|-----------------------|----------------------|---------------------|---------------|-----------------------|------------------------|------------------------|
|              |                                   |             | Klinker K                         | Yüksek Fırın Cürufu S | Silisyum Dumanı D | Doğal Puzolan P | Endüstriyel Puzolan Q | Silisyum Uçucu Kül V | Kalkeri Uçucu Kül W | Pişmiş Şist T | Kalker (Kireç Taşı) L | Kalker (Kireç Taşı) LL |                        |
| CEM I        | Portland Çimento                  | CEM I       | 95-100                            | -                     | -                 | -               | -                     | -                    | -                   | -             | -                     | -                      | 0-5                    |
| CEM II       | Portland Cürüflü Çimento          | CEM II/A-S  | 80-94                             | 6-20                  | -                 | -               | -                     | -                    | -                   | -             | -                     | -                      | 0-5                    |
|              |                                   | CEM II/B-S  | 65-79                             | 21-35                 | -                 | -               | -                     | -                    | -                   | -             | -                     | -                      | 0-5                    |
|              | Portland Silisyum Dumanlı Çimento | CEM II/A-D  | 90-94                             | -                     | 6-10              | -               | -                     | -                    | -                   | -             | -                     | -                      | 0-5                    |
|              | Portland Puzolanlı Çimento        | CEM II/A-P  | 80-94                             | -                     | -                 | 6-20            | -                     | -                    | -                   | -             | -                     | -                      | 0-5                    |
|              |                                   | CEM II/B-P  | 65-79                             | -                     | -                 | 21-35           | -                     | -                    | -                   | -             | -                     | -                      | 0-5                    |
|              |                                   | CEM II/A-Q  | 80-94                             | -                     | -                 | -               | 6-20                  | -                    | -                   | -             | -                     | -                      | 0-5                    |
|              |                                   | CEM II/B-Q  | 65-79                             | -                     | -                 | -               | 21-35                 | -                    | -                   | -             | -                     | -                      | 0-5                    |
|              | Portland Uçucu Külü Çimento       | CEM II/A-V  | 80-94                             | -                     | -                 | -               | -                     | 6-20                 | -                   | -             | -                     | -                      | 0-5                    |
|              |                                   | CEM II/B-V  | 65-79                             | -                     | -                 | -               | -                     | 21-35                | -                   | -             | -                     | -                      | 0-5                    |
|              |                                   | CEM II/A-W  | 80-94                             | -                     | -                 | -               | -                     | -                    | 6-20                | -             | -                     | -                      | 0-5                    |
|              |                                   | CEM II/B-W  | 65-79                             | -                     | -                 | -               | -                     | -                    | 21-35               | -             | -                     | -                      | 0-5                    |
|              | Portland Pişmiş Şistli Çimento    | CEM II/A-T  | 80-94                             | -                     | -                 | -               | -                     | -                    | -                   | 6-20          | -                     | -                      | 0-5                    |
|              |                                   | CEM II/B-T  | 65-79                             | -                     | -                 | -               | -                     | -                    | -                   | 21-35         | -                     | -                      | 0-5                    |
|              | Portland Kalkerli Çimento         | CEM II/A-L  | 80-94                             | -                     | -                 | -               | -                     | -                    | -                   | -             | 6-20                  | -                      | 0-5                    |
|              |                                   | CEM II/B-L  | 65-79                             | -                     | -                 | -               | -                     | -                    | -                   | -             | 21-35                 | -                      | 0-5                    |
|              |                                   | CEM II/A-LL | 80-94                             | -                     | -                 | -               | -                     | -                    | -                   | -             | -                     | 6-20                   | 0-5                    |
|              |                                   | CEM II/B-LL | 65-79                             | -                     | -                 | -               | -                     | -                    | -                   | -             | -                     | 21-35                  | 0-5                    |
|              | Portland Kompoze Çimento          | CEM II/A-M  | 80-94                             | 6-20                  |                   |                 |                       |                      |                     |               |                       |                        | 0-5                    |
|              |                                   | CEM II/B-M  | 65-79                             | 21-35                 |                   |                 |                       |                      |                     |               |                       |                        | 0-5                    |
| CEM III      | Yüksek Fırın Cürüflü Çimento      | CEM III/A   | 35-64                             | 36-65                 | -                 | -               | -                     | -                    | -                   | -             | -                     | -                      | 0-5                    |
|              |                                   | CEM III/B   | 20-34                             | 66-80                 | -                 | -               | -                     | -                    | -                   | -             | -                     | -                      | 0-5                    |
|              |                                   | CEM III/C   | 5-19                              | 81-95                 | -                 | -               | -                     | -                    | -                   | -             | -                     | -                      | 0-5                    |
| CEM IV       | Puzolanik Çimento                 | CEM IV/A    | 65-89                             | -                     | 11-35             |                 |                       |                      |                     | -             | -                     | -                      | 0-5                    |
|              |                                   | CEM IV/B    | 45-64                             | -                     | 36-55             |                 |                       |                      |                     | -             | -                     | -                      | 0-5                    |
| CEM V        | Kompoze Çimento                   | CEM V/A     | 40-64                             | 18-30                 | -                 | 18-30           |                       |                      | -                   | -             | -                     | -                      | 0-5                    |
|              |                                   | CEM V/B     | 20-38                             | 31-50                 | -                 | 31-50           |                       |                      | -                   | -             | -                     | -                      | 0-5                    |

Şekil 8: TS EN 197-1'e Göre Çimento Tipleri

Şekil 9’da katkılı çimentoların katkı adı ve açılımına örnek verilmiştir.

## CEM II /A-D 42,5 N



Şekil 9: Katkılı Çimentoların Katkı Adı ve Açılımı

### 1.2.4.1. Portland çimentosu (PÇ)

1824 yılında İngiltere’de Joseph Aspdin adında duvar ustası ince öğütülmüş kalker ve kil karışımını pişirerek elde ettiği malzemeyi daha sonra ince öğütmek suretiyle bir bileşik elde etmiştir. Bu bileşiğe su ve kum kattığında sertleşen yeni malzemenin İngiltere’nin Portland adasında bulunan taşlara benzediğini görmüştür. Daha sonra bulduğu bu yeni malzemeyi ilgili makamlara konuyu arz ederek patent almıştır. J. Aspdin’nin ilk zamanlarda yeterince pişirilememiş ve öğütülememiş olan malzeme şimdiki ile aynı olamamış fakat daha sonra 1845 yılında Isaac Johnson isminde başka bir İngiltere vatandaşı şimdiki çimento özelliklerine yakın pişirme ve öğütme gerçekleştirmiş ama hidrolik bağlayıcı olan ‘Portland Çimentosu’ patent olarak günümüze kadar gelmiştir. Portland çimentosu, beton, harç, sıva ve özel olmayan harçların temel bileşeni olarak dünya genelinde genel kullanımda en yaygın çimento türüdür. Günümüzde değişik katkıları ve priz süresinin düzenlenmesi için %3-6 alçı katılmak suretiyle gelişerek devam etmektedir.

### 1.2.4.2. PÇ’yi oluşturan oksitler ve özellikleri

PÇ’yi oluşturan hammaddeler kalker, kil ve marn’dır. Çimentonun yapısının yaklaşık %90’ı; CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> gibi temel oksitler, yaklaşık %10’u; MgO, SO<sub>3</sub> ve alkali oksitler (K<sub>2</sub>O, Na<sub>2</sub>O) oluşturmaktadır. Kalkerli malzemeler kalsiyum oksit değeri fazla olan kireçtaşı ve marn, silis içeriği fazla olan malzemeler ise kil, şeyl ve şist vb. minerallerdir. Bu hammaddeler 1-100 mikron öğütüldükten sonra yaklaşık 1500°C sıcaklıkta döner fırınlarda pişirilerek ayrışmaktadırlar. Kalkerin ayrışması ile CaO, kil ve diğer silisli malzemelerin ayrışması ile SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> oluşmaktadır (Baradan vd., 2015).

### **CaO (C)**

Kalsiyum oksit (CaO), çoğunlukla çimentoya kalkerden ( $\text{CaCO}_3$ , yaklaşık oranı %60-67) gelmektedir ve dayanımı etkileyen en önemli oksittir. Çimentonun bileşiminde bulunan CaO'nun tamamının  $\text{C}_3\text{S}$ ,  $\text{C}_2\text{S}$ ,  $\text{C}_3\text{A}$  ve  $\text{C}_4\text{AF}$  ana bileşenlerinde görev alarak betonun dayanımını gerçekleştirmesi beklenmektedir. Bazen serbest kalan CaO (sönmemiş serbest kireç), çimento hamurunun içerisinde su ile reaksiyona girerek sönmüş kireç [ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ] oluşturmaktadır. Oluşan [ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ] daha sonra, havanın  $\text{CO}_2$ 'si ile reaksiyon yaparak kalsiyum karbonata ( $\text{CaCO}_3$ ) dönüşerek genişmekte ve sonuçta genişleyen betonda çatlak oluşumuna neden olabilmektedir. Klinker olarak adlandırılan ana bileşenin üretiminde kireçtaşı ( $\text{CaCO}_3$ ) yüksek sıcaklıklarda pişirilerek sönmemiş kirece (CaO) dönüştürülür ve bu dönüşüm esnasında  $\text{CO}_2$  gazı oluşmaktadır. Bu durum, çimento endüstrisinin karbon ayak izini oluşturan en önemli faktördür (Akarsu, 2024).

### **SiO<sub>2</sub> (S)**

Çimento karışımına çoğu kilden gelen silisyum dioksitin ( $\text{SiO}_2$ , yaklaşık oranı %17-25), azı da kalkerden gelmektedir.  $\text{SiO}_2$ , hidrasyon ürünü olan C-S-H (tobermorit) jelinin yapısını oluşturan ana mineraldir. Bileşiminde silis içeriği fazla olan mineral katkıları, betonun içerisinde sönmüş haldeki kireç [ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ] ve su ile reaksiyon yaparak puzolanik reaksiyon meydana gelir ve sonuç olarak ek C-S-H jellerinin oluşumuna neden olmaktadır. Sonuç olarak betonların ileriki yaş dayanımlarında ciddi artışlar görülmektedir.

### **Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (A)**

Alüminyum oksit (%3-8), kilden gelen ve çimentonun ana bileşeni olan  $\text{C}_3\text{A}$ 'nın oluşumunda görev almaktadır. Çimentonda  $\text{Al}_2\text{O}_3$  /CaO oranı ne kadar düşükse su ile etkileşimi ve mukavemeti o kadar fazladır. Mukavemetinin belirleyici olduğu bina uygulamalarında  $\text{Al}_2\text{O}_3$ /CaO oranı daha düşük olan çimentolara öncelik verilmelidir. Alüminyum oksit, çimentonun dayanıklılığını ve mukavemetini artırır. Bu, özellikle yüksek sıcaklıklara ve kimyasal etkilere karşı dirençli yapı malzemeleri üretiminde önemlidir.

### **Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (F)**

Demir oksit'in (%0,5-6) çimentodaki görevi; genellikle grimsi renk verir. Çimento üretiminde kullanılan hammaddelerin erime noktasını düşürerek, üretim sürecinde enerji tasarrufu sağlar. Çimentonun mukavemetini artırarak, daha dayanıklı yapı malzemeleri elde edilmesine katkıda bulunur.

### **Magnezya, M (MgO)**

PC'nin içeriğinde bulunan MgO (magnezi), kalkerdeki  $MgCO_3$ 'ten gelmektedir. Pişirme esnasında döner fırınlarda oluşmaktadır. Çimentoda oluşan MgO ilk başlarda karma suyu ile reaksiyon sonucunda magnezyum hidroksit  $[Mg(OH)_2]$  sulu durumuna geçer ve daha sonra havadan gelen  $CO_2$  ile magnezyum karbonat ( $MgCO_3$ ) oluşur. Reaksiyon sonucunda açığa ısı ve su çıkmakta bu durum uzun zaman devam ederek betonda hacim genişmesi ile birlikte çatlamalara neden olabilmektedir. TS EN 197-1'de çimentoda MgO içeriğinin %5'i geçmemesi gerekmektedir.

### **Alkaliler ( $Na_2O$ ve $K_2O$ )**

Alkaliler çimento içerisine genellikle hammaddeden ve kullanılan katkılardan gelebilmektedir. Beton üretiminde kullanılan agregalar reaktif silis ve reaktif karbonat içerdiklerinde, çimentodan gelen alkalilerle birlikte 'alkali-agrega veya alkali karbonat' reaksiyonları yapabilmekte ve sonuç olarak alkali silika jelleri oluşarak betonun genişmesine ve çatlamasına sebep olmaktadır. Bu süreç uzun zaman almakta ve ileride betonda olumsuz durabilite problemlerine neden olmaktadır. Çimentodaki alkali içeriğinin zararlı etkisine önlem olarak TS EN 196-1'de  $Na_2O + 0,658 K_2O$  toplamının %0,6'yı aşmamasını önermektedir.

### **Kükürt, S ( $SO_3$ )**

Sülfatlar genellikle çimento içeriğine ham maddelerden, katkılardan veya dışarıdan özellikle çimentonun hızlı priz yapmasını önlemek için maksimum %5 oranında çimentoya katılan alçı ( $CaSO_4$ )'dan girebilir. Çimentodaki  $C_3A$ 'nın hızlı hidrasyonunu kontrol altına alabilmek için klinker ile birlikte kalsiyum sülfat ( $CaSO_4$ ) ile öğütülmektedir. Harç veya beton sertleştikten sonra içlerinde kalan veya dışardan gelebilen sülfat,  $C_3A$  ile reaksiyon yaparak alçı ve etringit oluşturur. Sonuç olarak betonda hacim genişmesi ve çatlama yapılabilir. Bu nedenle kimyasal analiz sonucu çimentoda bulunan  $SO_3$  miktarı TS'de %1-3 sınırını aşmamalıdır (TÇMB, 2009).

### **Klorür İçeriği (Cl)**

Klorürler çimento içine ham maddelerden veya katkılardan girebilir. Sertleşmiş beton içindeki bileşenlerden veya dışarıdan gelen klorürler, beton içindeki çelik donatıda ve metallerde korozyon riskini arttırmaktadır. Ayrıca, higroskopik madde olarak harç ve betonu rutubetli tutar (TÇMB, 2009). TS EN197-1'de  $0,10 \text{ kg/m}^3$ 'ten fazla olmaması gerektiği

belirtilmektedir. ASTM C150 çimentodaki klorür oranı %0,06'yı geçmemesini şart koşturmaktadır.

#### 1.2.4.3. Portland çimentosunu oluşturan ana bileşenler ve özellikleri

Tablo 1’de TS EN 197 Portland çimentosunun (PÇ) standartlarda bulunması gereken yaklaşık oksit değerleri verilmektedir. Tablo 2’de American Society for Testing and Materials’e (ASTM) göre PÇ’de bulunması gereken oksit değerleri verilmektedir (Erdoğan, 2015).

**Tablo 1:** PÇ’yi Oluşturan Ana Bileşenler ve Yaklaşık Miktarları

| Ana bileşen                     | Ana bileşen Özelliği                        | Formülü                                                             | Bileşimdeki<br>yakl. mik., (%) |
|---------------------------------|---------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|--------------------------------|
| C <sub>3</sub> S (Alit)         | Hızlı ve sürekli dayanım sağlar             | 3CaO.SiO <sub>2</sub>                                               | 54,1                           |
| C <sub>2</sub> S (Belit)        | Yavaş ve sürekli dayanım artışı sağlar      | 2CaO.SiO <sub>2</sub>                                               | 16,6                           |
| C <sub>3</sub> A<br>(Alüminate) | Sülfata karşı dayanımsızlığa sebep olur     | 3CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                                 | 10,8                           |
| C <sub>4</sub> AF<br>(Ferrit)   | Klinkerleşme sıcaklığını düşürmede etkiliye | 4CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 9,1                            |

**Tablo 2:** ASTM’ye göre PÇ’yi Oluşturan Ana Bileşenler ve Yaklaşık Miktarları (Erdoğan, 2015)

| Çimento<br>Tipi | Çimento tiplerinin özellikleri ve kullanım<br>yerleri                                   | Ana bileşenlerin yaklaşık<br>miktarı, (%) |                  |                  |                   |
|-----------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|------------------|------------------|-------------------|
|                 |                                                                                         | C <sub>3</sub> S                          | C <sub>2</sub> S | C <sub>3</sub> A | C <sub>4</sub> AF |
| I               | Normal PÇ, Genel amaç için kullanım için                                                | 49                                        | 25               | 12               | 8                 |
| II              | Değiştirilmiş PÇ, Tip I’e göre, Hidrasyon<br>ısısı daha düşük ve sülfata daha dayanıklı | 46                                        | 29               | 6                | 12                |
| III             | İlk dayanımı yüksek PÇ                                                                  | 56                                        | 15               | 12               | 8                 |
| IV              | Düşük ısılı PÇ, kütle betonlar için                                                     | 30                                        | 46               | 5                | 13                |
| V               | Sülfata dayanıklı PÇ                                                                    | 43                                        | 36               | 4                | 12                |

#### C<sub>3</sub>S (Alite)

PÇ’nin en önemli fazıdır ve PC’nin kütle olarak yaklaşık %50-70’ini oluşturmaktadır. Çimentolardaki C<sub>3</sub>S’i tanımlamak için kullanılan genel terim ‘Alite’dir. Bu isim, bünyesine çeşitli yabancı iyonların katıldığı tüm polimorfları ifade eder. PÇ’nin hidrasyonu sırasında

kalsiyum silikat hidratın (C–S–H) çekirdeklenmesine ve büyümesine rol oynayan  $C_3S$ 'tir. Bu hidratın çimento taneleri etrafında gelişmesinden dolayı, çimento hamurlarının prizlenmesinden ve sertleşmesinden sorumludur. Bu iyonlar içsel reaktiviteyi etkileyebilir ve çözünme sırasında salındıklarında C-S-H ile de etkileşime girebilirler (Begarın vd., 2011).

### **C<sub>2</sub>S (Belite)**

$C_2S$ , diğer adı belittir. Dikalsiyum silikat ( $C_2S$ ) genellikle  $\beta$  polimorfundadır. Toplam klinkerin %15-30'unu oluşturur ve belitin hidrasyon hızı çok yavaş olduğundan uzun zamanlı mukavemet gelişimine önemli ölçüde katkıda bulunur (Bullard vd., 2011).

### **C<sub>3</sub>A (Alüminat)**

Alüminat ( $Ca_3Al_2O_6$ ,  $C_3A$ ) tipik Portland çimentolarının %5-10'unu oluşturur. Su ile çok hızlı bir şekilde kimyasal olarak reaksiyona girerek yarı kararlı hidratlı yapılar oluştururlar. Alüminat reaksiyonunun hızı o kadar yüksektir ki, priz kontrol edici bir madde (alçı) eklenmediği sürece, çok hızlı bir prize neden olur ve beton işlenemez durum alır (Bullard vd., 2011).

### **C<sub>4</sub>AF (Brown Millerit)**

Brown Millerit, hidrasyon süreci  $C_3A$ 'nın kine çok benzeyen katı bir  $C_2A$ - $C_2F$  sistemi çözeltisidir. Ancak hidrasyon hızı daha yavaştır ve ürünlerde demir, alüminyumun bir kısmının yerini alır (Jawed vd., 1976). Sülfatların bol olduğu durumlarda etringit, sülfatların az olduğu durumlarda ise monosülfat oluşur. Bir üründen diğerine dönüşüm mümkündür (Jennings, 1983). Etringit ve monosülfat oluşumu, betonun erken dayanımını artırabilir.  $C_4AF$ 'nin yüksek oranı betonun korozyonunu hızlandırabilir.

## **1.2.5. Çimentonun Hidratasyonu ve Tanımlar**

Bünyesinde yüksek ısıyı barındıran çimento taneciklerinin ana bileşenleri su ile temas eder etmez her biri ayrı ayrı kimyasal reaksiyonlar yaparlar ve her değişik hidrasyon ürünleri ortaya çıkarırlar. Çimento hamurunun priz yapması (sertleşmeye başlaması) ve dayanım kazanması, çimentonun ana bileşenlerinin miktarına ve oluşan hidrasyon ürünlerinin özelliklerine bağlıdır.

### **1.2.5.1. Hidratasyon**

Çimento ve beton bileşenleri su ile karıştırıldıktan sonra ilk dakikalarda plastik şekil verilebilir kıvamda ve daha sonraki saatlerde priz yaparak sertleşmektedir. Çimento ile suyun

kimyasal reaksiyonu sonucu oluşan ürünler ve açığa çıkan ısıya “hidratasyon” denir. Hidratasyonun gelişebilmesi için en önemli iki şart suyun ve gerekli sıcaklığın sağlanmasıdır.

#### 1.2.5.2. Priz

Çimento pastası veya beton karışımları su ile temasından sonra ilk dakikalarda plastik yani şekil verilebilir haldedirler. Daha sonra hidratasyon ürünlerinin oluşması ile katılaşma başlamaktadır. Katılaşarak şekil verilememeye durumuna gelmesine kadar geçen süreye priz alma süresi denir (Baradan vd., 2015)

#### 1.2.5.3. Ani priz

Çimento tanecikleri su ile temasında almış oldukları yüksek ısıнын etkisi ile çok hızlı hidratasyon yaparak sertleşme (priz yapma) eğilimindedirler. Bu durumun önüne geçebilmek için klinkerin öğütülmesi sırasında klinkerin %5’ini geçmeyecek şekilde klinkere alçı katılarak priz süresi uzatılmaktadır. Klinkere alçı ( $\text{CaSO}_4$ ) yeterince katılmadığında  $\text{C}_3\text{A}$  ve  $\text{C}_4\text{AF}$  su ile çok hızlı kimyasal reaksiyona girerek priz olayının (katılaşmanın) çok hızlı gerçekleşmesine neden olurlar. Bu duruma ani priz denilmektedir.

#### 1.2.6. Hidratasyon Sonucu Oluşan Ürünler ve Özellikleri

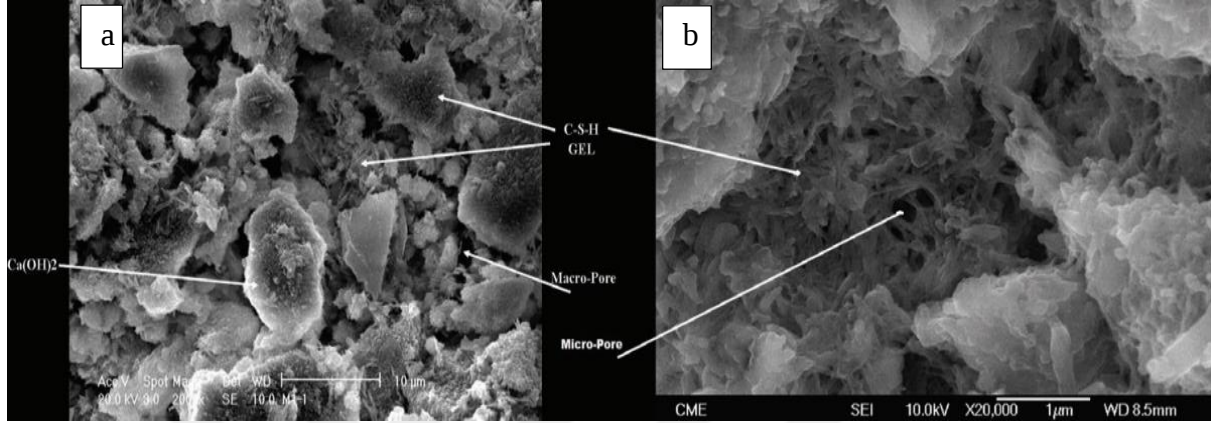
Çimento tanecikleri su ile temasında hidratasyon olayı başlamaktadır. Çimento taneciklerini oluşturan ana bileşenlerin ( $\text{C}_3\text{S}$ ,  $\text{C}_2\text{S}$ ,  $\text{C}_3\text{A}$ ,  $\text{C}_4\text{AF}$ ) herbiri su ile ayrı ayrı reaksiyon yaparak pastanın veya betonun sertleşmesini sağlayan değişik hidratasyon ürünleri ortaya çıkarmaktadırlar.

##### 1.2.6.1. C-S-H (Tobermorit) fazı

C-S-H, reaksiyonun ana ürünüdür, genellikle hacim olarak çimento hamurunun yaklaşık %60’ını kaplar ve beton dayanımının ana kaynağıdır. Genellikle ‘C-S-H’ olarak okunur. Çizgiler,  $\text{SiO}_2$ ’nin  $\text{CaO}$ ’ya kesin bir oranının olmadığını gösterir. Si/Ca oranı hidratlı Portland çimentosunda yaklaşık 0,45-0,50’dir. Portland çimentosu hidratasyon prosesinin temel ürünü olan kalsiyum silikat hidrat (C-S-H), sertleşmiş çimento hamurunun mukavemet ve büzülme gibi önemli mekanik ve fiziksel özelliklerine önemli bir katkıda bulunur (Ciach vd., 1971). Çimentonun ana bileşenlerinden olan kalsiyum silikatların ( $\text{C}_2\text{S}$  ve  $\text{C}_3\text{S}$ ) hidratasyonu sonucunda ürün olarak kalsiyumsilikat hidrat (C-S-H) jelleri oluşmaktadır.



Eşitlik 1.1 ve 1.2’den görüldüğü gibi kalsiyum silikatlı bileşenlerin hidrasyon reaksiyonu sonucunda C-S-H ve CH ürünleri ortaya çıkmaktadır. CSH jeline ‘tobermorit’ ismi de söylenmesinin nedeni doğada aynı isimde başka bir minerale benzemesinden dolayıdır (Erdoğan, 2015). Şekil 10’da C-S-H Jellerinin; (a) İlk başlardaki durumu, (b) Olgunlaşmış durumu verilmektedir.

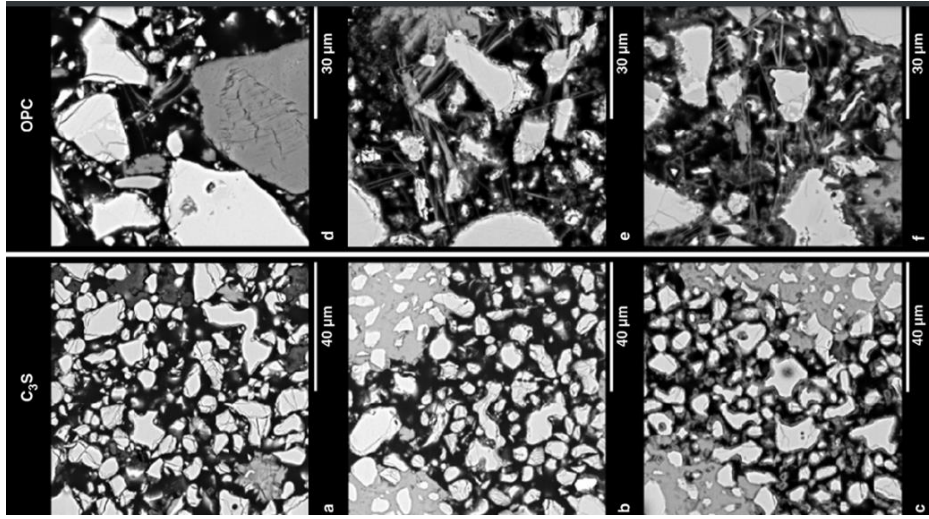


**Şekil 10:** C-S-H Jellerinin; (a) İlk Başlardaki Durumu, (b) Olgunlaşmış Durum (Cerro, 2018)

#### 1.2.6.2. CH (Sönmüş Kireç)

CH veya diğer adı Portlandittir.  $\text{Ca(OH)}_2$ , genellikle ‘CH’ olarak kısaltılır. CH’nin ana kaynağı Alite’nin hidrasyonudur. Alite’nin Ca/Si oranı 3/1’dir ve C-S-H’nin Ca/Si oranı yaklaşık 2/1’dir, dolayısıyla CH üretmek için fazla kireç mevcuttur.

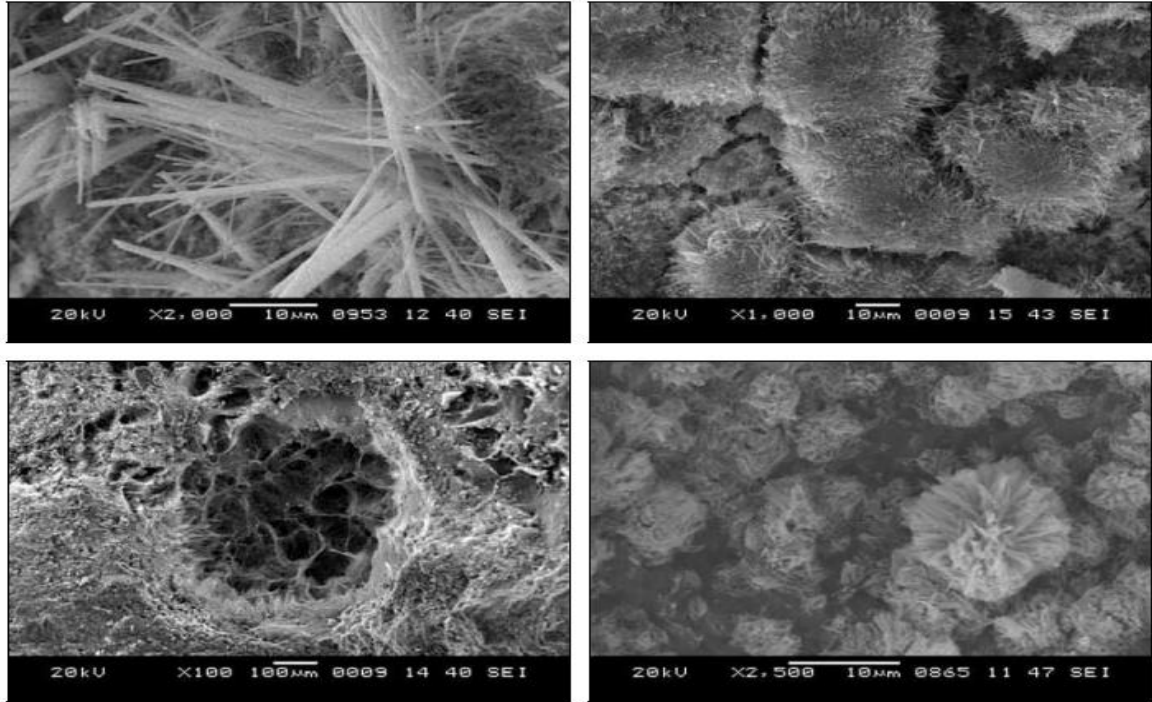
CH, C-S-H ile birlikte çimento hidratasyonunun ana ürünlerinden biridir. CH’nin beton pH’ını bazik olarak ayarlama da kritik bir rol oynadığı ve böylece donatıyı korozyondan koruduğu iyi bilinmektedir. Diğer yandan, betonda çiçeklenme oluşumunda rol oynadığı bilinmektedir (Skalny vd., 2001). Ortamda bulunan nanosilika, çimentonun hidratasyonunu hızlandırılabilir ayrıca nanosilika, çimento taneciklerine eklendiğinde,  $\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}$  oluşur ve mevcut  $\text{Ca}^{2+}$  ile reaksiyona girerek ek bir kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) oluşturur (Singh vd., 2013). Şekil 11’de erken yaş  $\text{C}_3\text{S}$  ve çimento pastalarında CH’in değişimi gösterilmektedir.



**Şekil 11:** Erken Yaş  $C_3S$  ve OPC Pastalarında CH'nın Değişimi (a ve d): 4 Saat; (b ve e): 8 Saat; c ve f): 16 Saat (Gallucci & Scrivener, 2007)

#### 1.2.6.3. Aft fazı (ettringit; trisülfat)

Çimentonun hidrasyonunda oluşan iki grup minerallerdir. Hidratlı çimentoda, en yaygın görülen oluşum Aft (ettringite) fazı sonra da AFm (monosülfathidrat) fazıdır. Kalsiyum sülfat alüminat olan etrengit,  $C_3A.3CaSO_4.32H_2O$  bileşmindedir ve üç (t-tri) anhidrit sülfat grubu içerir. İğne şeklinde kristal yapılı bir kalsiyum sülfalüminat hidrat olan etringit, ilk hidrasyon sırasında oluşmaya başlayan bir hidrasyon ürünüdür (Kuzel, 1996). Şekil 12'de etringite ait mikrograflar verilmiştir.

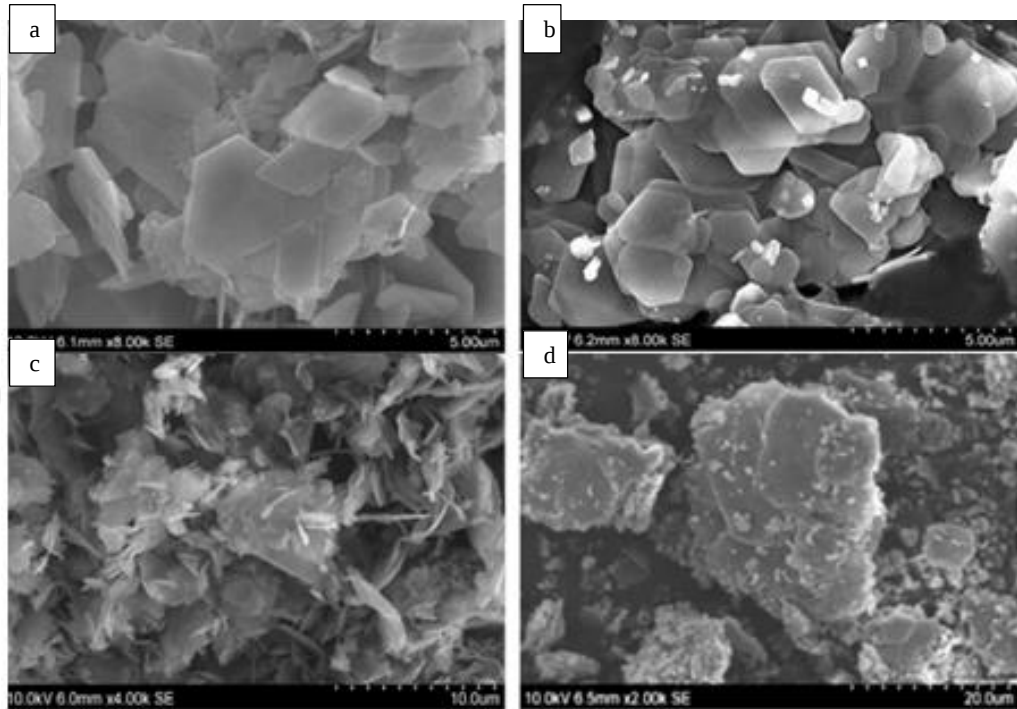


**Şekil 12:** Literatürde Gözlenen Bazı Etringit Örnekleri (Ormsby & Liu, 2005)

#### 1.2.6.4. AFm fazı (mono sülfat)

AFm ( $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--Fe}_2\text{O}_3\text{--mono}$ ) fazlar, hidrate tetrakalsiyum alüminat-ferrit bileşikleridir. Portland ve kalsiyum alüminat çimentolarının hidratasyonu sırasında oluşurlar (Dilnesa vd., 2014). AFm'yi katmanlı yapıya sahip, altıgen veya sahte altıgenler oluşturur.  $[\text{Ca}_2(\text{Al,Fe})(\text{OH})_6] \cdot X \cdot x\text{H}_2\text{O}$  genel formülüne sahip köşegen plakalardan oluşur. Formülde 'X' anyonları, 'H' ise suyu temsil etmektedir (Taylor, 1997).

Monosülfatın ( $\text{C}_3\text{A} \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 13\text{H}_2\text{O}$ ) yapısı etringitten daha farklı olarak, ince plaka formunda hekzagonal ve oda sıcaklığında yarı kararlı yüksek sıcaklıklarda ise kararlı bir kristaldir. Oda sıcaklığındaki monosülfat yapısına ek sülfat kaynağı nem isabet ederse, etringite dönüşebilme kabiliyeti vardır (Fu, 1996). Şekil 13'te literatürde gözlenen bazı AFm örnekleri verilmiştir.



Şekil 13: Literatürde Gözlenen Bazı AFm Örnekleri (Baquerizo vd., 2015)

### 1.3. ENDÜSTRİYEL ATIKLAR VE BETONDA KULLANIMI

Endüstriyel atıklar, sanayi faaliyetleri sonucu ortaya çıkan ve genellikle geri dönüşüm veya bertaraf edilmesi gereken materyallerdir. Bu atıklar, üretim süreçlerinde kullanılan malzemelerin yan ürünleri, hatalı ürünler, bakım-onarım vb sonucunda oluşabilir.

Hızlı nüfus artışına paralel olarak gelişen ekonomiler ve kentleşme ile tüm dünyada katı atık oluşumunun 2050 yılına kadar yıllık 27 milyar tona ulaşması bekleniyor (Laurent vd., 2014). Bu durum doğal kaynaklara, ekosistemlere ve daha da önemlisi insan sağlığına ciddi zararlar verebileceği için ülkeler açısından son derece önemlidir. Çevresel sürdürülebilirliğin

gerçekleşmesi için ‘yeşil sıfatı ile’ kimya ve diğer teknolojilerin benimsenmesi kavramı son yıllarda sürekli araştırılmış ve benimsenmiştir. Daha da önemlisi, atığın çöp kirliliği olarak benimsendiği geleneksel anlayış, yerini atığın başka bir kaynak olarak ele alındığı bir tarafa doğru giderek yaygınlaşıyor.

### **1.3.1. Yüksek Fırın Cürufu (YFC)**

YFC, demir-çelik fabrikalarında yüksek fırın diye adlandırılan kazanlarda ham demirin eritilerek elde edilmesi sırasında yoğunluk farkından dolayı kazanlardan yukarı çıkan bir yan üründür. Demir cevheri, kireç taşı ve kömürün fırında eritilmesi ile elde edilir. Bu sırada demir, cevherinden demir ayrılıp dibe çökerken yan ürün olarak cüruf, hafif olmasından dolayı ayrılarak yukarı çıkar. Uçucu kül ve yüksek fırın cürufu gibi yapısında amorf  $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$  ve  $CaO$  içeren malzemeler, alkali aktivatörler kullanarak kuvvetli bir bağlayıcı madde üretimi mümkündür. Alüminosilikat uçucu küllerin aktivatörlerle reaksiyonu sonucunda “geopolimer” adı verilen amorf yapıdaki inorganik polimerler oluşurken, YFC’nin reaksiyonu sonucunda C-S-H jeline benzer hidrate kalsiyum silikatları oluşmaktadır. Alkali aktivasyonu ile üretilen bağlayıcıların kullanımı, yüksek mekanik performans, düşük enerji giderleri, düşük kirlenici gaz salınımları ( $CO_2$ ,  $SO_2$ ,  $NO_x$  vb.) ve çevrenin daha az tahribi gibi avantajları vardır. Ayrıca, büyük ölçüde atık malzemelerin kullanımıyla, atıkların çevreye verdiği zararlar ve depolama sorunları önemli ölçüde azalmaktadır (Aydın, 2010).

YFC, 1400-1600°C arasında bir sıcaklıkta oluşmaktadır. YFC’lerin soğutulması yavaş bir şekilde gerçekleştirildiği zaman kristal bir yapı meydana gelir ve betonda agrega olarak kullanılabilir. Yarı kararlı ve camsı yapıdaki YFC’ler, sodyum hidroksit veya kalsiyum hidroksit gibi aktivatörler kullanmak suretiyle bağlayıcı özellik kazanabileceği gibi hidrasyon sonucu ortamda bulunan  $Ca(OH)_2$ ’yi kullanarak da ilave CSH yapıları oluşarak hidrolik bağlayıcı özellik kazanabilir (Spellman, 1982). Granüla YFC’li çimentolar ile üretilen betonların hidratasyon ısıları ve su geçirimsizlikleri düşük, kimyasal etkilere (sülfat) ve korozyona karşı dayanıklılıkları yüksektir (Baradan vd., 2015).

### **1.3.2. Zeolitik Tüf /Puzolan**

Puzolan, ASTM C 618-94’te, kendi başına bağlayıcı özelliği olmayan fakat çok ince öğütüldüklerinde ve nemli ortamlarda kireç ile kimyasal reaksiyon yaparak bağlayıcı özellik kazanan (CSH jeli üreten) silisli ya da silisli-alüminli yapay ya da doğal maddelerdir. Puzolanların uygun miktarlarda çimentolarda katkı olarak kullanılması hem beton endüstrisinde ekonomiklik hem de teknik ve ekolojik faydalar getirmektedir. En bilinen yapay

puzolanlar çeşitli endüstrilerin atık malzemeleri olan uçucu kül, endüstriyel cüruflar ve silis dumanıdır. Doğal puzolanlar genellikle volkanik kökenlidirler ve volkanizmanın yakın zamanlarda aktif olduğu bölgelerde bulunurlar. Bu doğal malzemelerin kireçle karıştırıldıklarında bağlayıcı özellik kazandığı milattan öncesinden belli bilinmektedir. Betonda bağlayıcı olarak puzolan kullanımı ile betonun hidrasyon ısısı düşer ve kimyasal etkilere dayanıklılık kazanabilir.

#### **1.3.2.1. Sıkı yapılı kayaçlar (tüfler)**

Volkanik kökenli tras yatakları, genellikle sıkışmamış parçacıkların metamorfoz yada diğer doğal işlemlerle, hava etkisine maruz kalma (weathering) ve taşlaşmasından oluşan sıkışık katmanlarla (tüfler) beraber bulunur. Hava etkisine maruz kalma, trasın camsı yapısının zeolitlenmesine (zeolitisation) ya da killeşmesine (argillation) sebep olabilir. Zeolitlenme, traslarda bulunan camsı yapının dış etkilerle zeolit grubu minerallere dönüşmesidir. Killeşme ise camsı yapı kil minerallerine dönüşür. Zeolitlenme, malzemenin puzolanik özelliklerinde iyileşmeye yol açarken, killeşme için tam tersi bir durum söz konusudur (Sersale, 1958; Malquori, 1962).

#### **Doğal tüflerin puzolanik aktivitesi**

Puzolanların bağlayabileceği en fazla  $\text{Ca(OH)}_2$  miktarı ve bağlanma işleminin hızı puzolanik aktivite olarak ifade edilmektedir. Bu iki durum puzolanda bulunan aktif fazlara ve miktarına bağlıdır. Aktif madde miktarı ile bağladığı  $\text{CaOH}$  doğru orantılıdır. Puzolanik aktivitenin hızı puzolanın inceliğine, özgül yüzey alanına ve minerolojik yapısına bağlıdır. Zeolitik yapıdaki puzolanlar genel olarak camsı puzolanlara kıyasla daha aktiftir (Costa & Massazza, 1977).

#### **1.3.2.2. Bayburt tüfü/taşı (BT)**

Bayburt ili,  $40^{\circ}14'12''$  kuzey paralelleri ve  $40^{\circ}13'25''$  doğu meridyenleri arasında yer almakta, sahip olduğu jeolojik yapı olarak 1. ve 2. zaman oluşumlarından kalma, yer hareketlerini tamamlamış ve deprem riski olmayan masif kayalı yerler olmanın gereği olarak çeşitli maden yataklarının olduğu bölgedir. Yörede “Bayburt Taşı” olarak bilinen ve bölgeye ciddi ekonomik gelir kaynağı sağlayan tüfler, yaygın olarak kullanılan endüstriyel hammadde kaynaklarından biridir. Hafif, doğal ve kolay işlenebilir olmasından dolayı hem yapı taşı olarak hem de dekoratif amaçlı olarak özellikle cami, sebil gibi tarihi eserlerin yapımında ve onarımında yüzyıllar boyu yaygın olarak kullanılmıştır. Tablo 3’te bazı trasların kimyasal özellikleri verilmiştir (Erdoğan, 1996).

**Tablo 3:** Bazı Trasların Kimyasal Özellikleri (Erdoğan, 1996).

| Puzolan          | Ülke        | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaO  | MgO  | Na <sub>2</sub> O | K <sub>2</sub> O | TiO <sub>2</sub> | SO <sub>3</sub> | KK   | Aktif Faz            |
|------------------|-------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|------|-------------------|------------------|------------------|-----------------|------|----------------------|
| Bayburt          | Türkiye     | 57.74            | 12.14                          | 3.84                           | 4.84 | 0.55 | 0.64              | 2.5              | 0.73             | 0.3             | -    | Camsı faz, klinopti. |
| Zeolit (klinopt) | japonya     | 71.65            | 11.77                          | 0.81                           | .88  | 0.52 | 1.8               | 3.44             | -                | 0.34            | 9.04 | Klinoptilolit        |
| Tras             | Bulgaristan | 71.63            | 10.03                          | 4.01                           | 1.93 | 1.22 | 2.35              | -                | -                | 3.05            | -    | -                    |
| Sarı tuf         | İtalya      | 54.68            | 17.70                          | 3.82                           | 6.66 | 0.95 | 3.43              | 638              | -                | -               | 9.11 | -                    |

Şekil 14’te Bayburt il haritası ile BT’lerin tabakaları ve tabakaların Kuzey Doğu-Güney Batı doğrultusundaki KB’ye doğru eğimleri gösterilmiştir. Tüfler genel olarak iki seviye halinde ve iri taneliden başlayıp ince taneli ile son bulmaktadır. BBT’nin değişik damarlarında tuf içlerinde yeşil renginde (zeolit ve klorit) beneklerin olduğu ve kayacın yoğunlaştığı bazı yerlerde zeolitlenme ve kloritlenme nedeniyle tamamen yeşil tonlarına sahip olduğu gözlemlenmiştir (Arslan, 2004).

**Şekil 14:** Bayburt İli Haritası ve Taş Rezervinden Görünüş

#### **Bayburt sarı taşı/tüfü (BST)**

BST daha çok tarihi yapılarda, dekoratif işlerde, mezar, su sebili vb. mimari tasarımlarda kullanım alanına sahiptir. BST’nin rezervi BBT’ye göre sınırlı olması ve mevcut ocakların da kapanması bu taşta olan ilgiyi azaltmaktadır. MTA mineraloji ve petrografi laboratuvarında Bayburt taşları üzerinde gerçekleştiren analizlere göre: BST kırıntılı kireçtaşı olarak adlandırılmış olup, sarımsı turuncu renkte, masif küçük taneli makroskobik yapıya sahiptir (Şahin, 2018). Şekil 15’te BST’ye ait çeşili kullanım alanları gösterilmiştir.



**Şekil 15:** BST’ye Ait Çeşitli Kullanım Alanları

### **Bayburt beyaz taşı/tüfü (BBT)**

Rezervi diğer türlere göre fazla olan BBT; hafif, görsel olarak daha estetik ve işlebilirliğinin kolay olmasından dolayı günümüzde en fazla çıkarılarak işlenen tüf türüdür. BT sertliğinin düşük olmasından dolayı ocaklarda tel kesme yöntemi ile çıkarılmaktadırlar. Yaklaşık 10 milyon yılda oluştuğu söylenen Bayburt taşı, ocaklardan nihayi ürün elde edilinceye kadar geçen süreçte yaklaşık %50 oranında fire vererek atık oluşmaktadır (Avşaroğlu, 2020). Tüfit içerisinde, ağırlıklı olarak cam parçaları, pomza, plajiyoklaz, sanidin, biyotit gibi kristal parçaları ile bu minerallerin bozulması ile oluşan zeolit, klorit, karbonat ve kil mineralleri bulunmaktadır (Arslan vd., 2004; Akt. Yılmaz vd., 2005). Özellikle iç ve dış mekan kaplamalarında cami mimberi, vaaz kürsüsü, mezar vb. kullanım alanlarında sıklıkla tercih edilmektedir. Şekil 16’da BBT’ye ait çeşili kullanım alanları gösterilmektedir. Bayburt taşı kimyasal analizleri Bayburt Belediyesi tarafından MTA Enstitüsüne yaptırılmış ve patent alınmıştır (Türkiye Patent Entitüsü, [TPE] /Doğal Taşlar, 442).

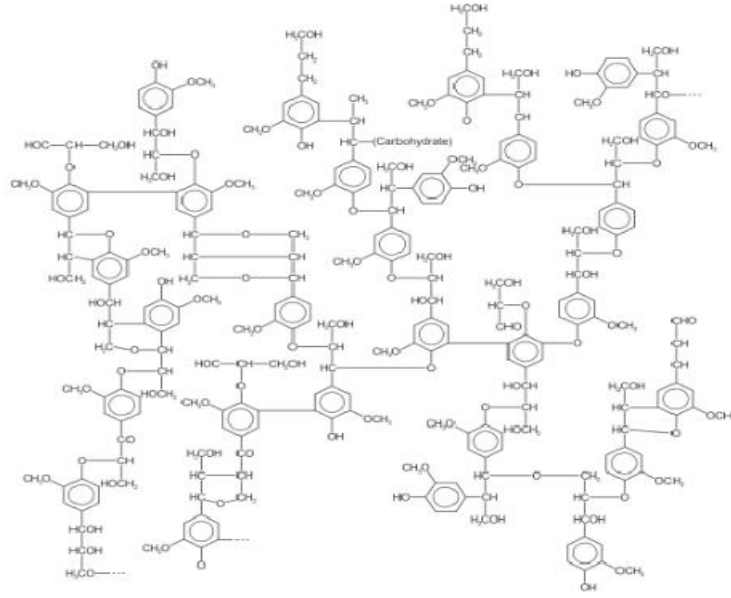


**Şekil 16:** BBT’ye Ait Çeşitli Kullanım Alanları

### **1.3.3. Lignin (L)**

Kağıt endüstrisinde atık olarak ciddi miktarlarda elde edilen lignin, dünyada selülozun ardından en çok bulunan polimerik organik bileşiktir. Atık bir madde olan lignin, bu özelliği ile günümüzde ve ilerideki zamanlarda araştırmalara konu olma potansiyeline sahiptir (Fengel & Wegener, 1989). Lignin, dünyada selülozdan sonra ikinci önemli doğal polimerdir. Lignin, Latince “odun” anlamına gelen lignum kelimesinden türemiştir. Bitkilerin hücre duvarında bulunur ve doğrudan bitki hücre duvarına salgılanan serbest lignin monomerlerinin oksidatif

bağlanmasıyla oluşan selüloz mikrofibrilleri ve hemiselüloz ile birlikte ana bileşenlerden biridir (Kuhad & Singh, 2007). Metoksi grubu içeren fenilpropan yapılarından oluşan lignin, üç boyutlu amorf bir polimerdir ve selüloz ve hemiselüloz ile birlikte lignoselüloz biyokütlenin kütlece %15-30 ve enerjice %40'nı oluşturur (Hill, 2006). Şekil 17'de ligninin kimyasal yapısı verilmektedir.



**Şekil 17:** Ligninin Kimyasal Yapısı (Adler, 1977)

Lignin, tek yıllık bitkilerin (Ayçiçeği ve hububat gibi) ağırlaşan baş ve gövdelerini ayakta tutabilecek desteklenmiş bir gövdeye sahip olmaları için destekleme görevi üstlenmiştir. Bir çimento gibi davranan lignin, hücre çeperindeki uzun ve ince polisakkarit liflerinin arasındaki boşlukları doldurarak onları birbirine bağlamaktadır. Lignin daha çok ağaç ve ağaççıklar gibi odun teşkil eden bitkilerde bulunmakla beraber, buğday sapı, şeker ve bambu kamışları, eğrelti otu, yer fıstığı ve baklagillere giren bitkilerin dokularında da görülmektedir (Huş, 1971).

Ligninin görevi, bitki hücre duvarlarında selüloz ve hemiselüloz arasındaki boşluklarda yer alarak ve tüm lignoselüloz iskeleti bir arada tutmaktadır (Ritter, 2008). Özellikle ham petrolün azalan rezervlerine alternatif arayışlar bilim camiasını enerji ve malzeme üretimi için yenilenebilir hammaddeler keşfetmeye yöneltmiştir (Carlsson, 2009). Bu amaçla lignoselülozik biyokütle, günümüzde kısmen indirgenmiş çoklu karbon molekülleri içerdiğinden, karbon bazlı ürünlerin yerini alacak özellikle umut verici bir hammadde konumundadır (Dodds & Gross, 2007).

### 1.3.3.1. Atık ligninin geri dönüşümü

Lignin iki farklı yöntemle odundan elde edilmektedir. İlki sülfite metodu. Burada odun, sülfirikasitin ( $H_2SO_4$ ) tuzları ile pişirilerek lignin ayrıştırılmaktadır. Diğer de kraft metodu olup odun burada sodyum hidroksit ( $NaOH$ ) ve sodyum sülfür ( $Na_2S$ ) çözeltilerinde pişirilerek lignin ayırt edilmektedir (Huş, 1971). Kraft lignini ilk olarak 1879 yılında Carl F. Dahl tarafından patentlenen ve Almanca “güçlü” anlamına gelen sağlam dayanıklı Kraft kağıt hamuru üretiminden elde edilen lignindir. 155-175°C’de sıcak su, sodyum hidroksit ve sodyum sülfür ( $Na_2S$ ) karışımında (beyaz likör) odun yongalarından, lignini uzaklaştırarak selüloz elde etmeyi hedefleyen bir yöntemdir. İşlem sırasında açığa çıkan Kraft siyah likörden lignin eldesini asitle çöktürme ve elektrokimyasal yöntemler sıkça kullanılmaktadır. Asitle çöktürmede siyah liköre ait pH değeri 13’den 5-7,5 indirilirken elde edilen Kraft lignini %1,5-3 (w/w) içermektedir (Gülsoy & Pekgözlü, 2023). Kağıt hamuru üretiminin yan ürünü olan ve lignin içeren siyah likörler, genellikle kağıt endüstrisi tarafından yenilenebilir bir enerji kaynağı olarak, inorganik maddeleri ve enerjiyi geri kazanmak için yakıt olarak kullanılmaktadır (Bajpai, 2015).

### 1.3.3.2. Ligninin yapısı ve kullanım alanları

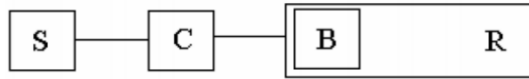
Lignoselülozik biyokütlenin üç ana bileşeni selüloz, lignin ve hemiselülozdur (Zakzeski vd., 2010). Bol miktarda aromatik bileşik kaynağı olan lignin, lignoselülozik biyomateryalin %15-35’ini oluşturur (Azadi vd., 2013). Lignin oldukça karmaşık dallanmış gruplaşması nedeniyle kristal olmayan (amorf) bir yapıya sahiptir (Prakash vd., 2015). Bol miktarda bulunmasına rağmen, lignin genellikle kağıt ve kağıt hamuru endüstrisinde atık veya düşük değerli bir malzeme olarak değerlendirilmektedir. Küresel alanda yıllık kimyasal kağıt hamuru üretimi yaklaşık 150 milyon tondur ve kağıt hamuru yapım sürecinden elde edilen tahmini lignin miktarı yılda yaklaşık 70 milyon tondur (Berlin & Balakshin, 2014). Ligninin %95-98’i yanmayla ısıtma veya enerji üretimi için kullanılıyor. Ligninin %2-5’den azı daha değerli alanlarda, özellikle gıda ve beton katkı maddesi, dağıtıcı, reçine ve bağlayıcı malzeme olarak da kullanılmakta, dağıtıcıların, yapıştırıcıların ve yüzey aktif maddelerin formülasyonunda kullanılmaktadır. Asfalt, kaplama (ulaşım) mühendisliğindeki en önemli malzemelerden biridir. Farklı molekül ağırlıklarına sahip hidrokarbonlar ve bunların metalik olmayan türevlerinden oluşan koyu kahverengi kompleks bir karışımdır. Ligninin kimyasal yapısı asfalta benzediğinden karbon bazlı bir hidrokarbon malzemedir (Yao vd., 2022).

### 1.3.4. Reaktif Boyar Maddeler (RBM) ve Özellikleri

Tekstil endüstrisinde başlangıçta parlak renk ve çeşitlilik sağlamak için azoik ve bazik boyarmaddeler kullanılmaktaydı. RBM'ler ise ilk kez 1956 yılında ICI firması tarafından piyasaya sunulmuş ve selüloz, protein ile poliamid gibi elyaflarla güçlü kovalent bağlar oluşturabilme özellikleri sayesinde hızla yaygınlaşmıştır (Lewis, 2014; Motschi, 2000; Alanko vd., 1978). Ayrıca RBM'ler soğuk ortamda da işlevsel olarak kullanıldığı için enerji tasarrufu sağlamakta ayrıca renk serisi ve parlaklığı nedeniyle hızla gelişti (Yıldırım, 2009). RBM'ler uygun koşullarda liflerle kovalent bağ oluşturabilen tek boyarmadde grubudur. Basit ve küçük molekül yapısı bilinen karakteristik özelliklerindendir. Molekül ağırlıkları genellikle 69-221 g/mol'dür. Küçük parçacık özellikleri pamuk lifine çok hızlı difüze olmalarını sağlamaktadır. İçerdikleri gruplar sayesinde suda kolayca çözünebildikleri için hazırlanan boyarmadde çözeltileriyle hemen boyama yapılabilir (Wakelyn vd., 2007). Reaktif boyar maddelerin ortak özelliği reaktif olmaları ve kromofor taşıyan renkli grubun yanında bir reaktif grup bir de çözünürlük sağlayan grup içermeleridir (Yılmaz, 2018). RBM'ler su kaynaklarını en fazla kirlüten maddelerdir. Boyalar genellikle anorganik, tekstilde kullanılan boyarmaddeler ise organik yapıdadır ve en önemli organik grup azo grubudur. Günümüzde tekstil, boya, kâğıt ve baskı endüstrilerinde en çok sentetik boyar maddeler kullanılmaktadır (Bozok, 2005).

#### 1.3.4.1. RBM'lerin kimyasal yapısı

RBM'lerin yapısında; suda çözünebilen grup (S), moleküle renk veren grup (C), köprü bağları grubu (B) ve reaktif grup (R) olmak üzere dört grup bulunmaktadır. Şekil 18'de RBM'lerin genel yapısı şematik olarak gösterilmektedir.



**Şekil 18:** RBM'lerin Şematik Olarak Genel Yapısı (Usta, 2019)

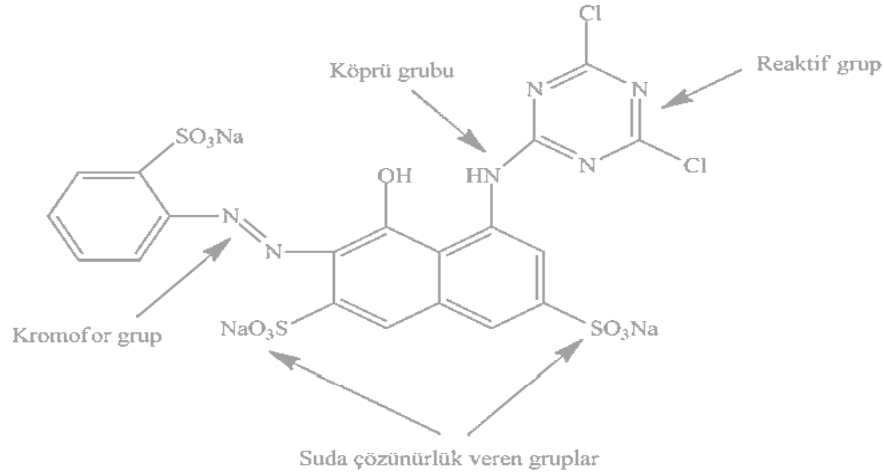
S: Suda çözünebilen grup,

C: Moleküle renk veren (kromofor) grup,

B: Köprü bağları grubu RBM molekülündeki renklendirici grupla reaktif grubu birbirine bağlayan -SO<sub>2</sub>-, -CO-, -NH- gibi gruplar köprü bağlarıdır.

R: Reaktif grup, liflerin fonksiyonel grupları ile kovalent bağ yapan gruptur. Selüloz liflerinde -OH, protein esalı liflerde ise -NH<sub>2</sub>, -COOH, -OH ve tiyoalkol reaktif grup ile reaksiyona girecek olan lifin fonksiyonel gruplarıdır. Tekstil boyama süreci sulu ortamda

gerçekleştirildiğinden su içindeki  $-OH$  iyonları da reaktif grupla reaksiyona girerek boyar maddenin hidrolizini gerçekleştirmektedir (Başer & İnanıcı, 1990; İçoğlu, 2006). RBM'nin kimyasal yapısı Şekil 19'da sunulmuştur.



**Şekil 19:** Reaktif Boyanın Yapısı (Cengiz, 2018)

#### 1.3.4.2. RBM'lerin kullanım alanları

RBM'ler genellikle pamuk, yün, akrilik, asetat, naylon ve polyester elyaflarının boyanması işlemlerinde kullanılmaktadır. RBM'ler hem boyama hem de baskı işlemlerinde kullanılmakla birlikte hemen hemen bütün lif türlerine kovalent bağlarla bağlanabilen ve yıkama sonunda renk solmasının oluşmadığı, kolayca sökülemeyen özelliktedirler. Reaktif boyaların yüksek yıkama haslığı, alkalın pH koşulları altında pamuk selülozunun hidroksil grupları ile kovalent bağlar oluşturan reaktif grup(ların)dan kaynaklanmaktadır (Khatri vd., 2015). Yıkama sonrası elyaf üzerinde kalan boya, elyaf üzerine sabitlenmiş boya olarak kabul edilir ve boyama verimliliği genellikle %50-80 aralığındadır. İstenilen renk derinliğini elde etmek için gerekli olan boyanın %20-50'si çevreye deşarj edilmekte bu durum ciddi çevresel sorunlara neden olmaktadır. Reaktif boyalar, çözelti halinde pamuk elyafının negatif yüklü yüzeyi tarafından itilen, çözünür anyonik boyalardır. Fibere boya transferini (tükenmeyi) desteklemek için elektrolit olarak sodyum klorür veya sodyum sülfat gibi bir tuz eklenir (Gordon & Hsieh, 2007). Tekstil endüstrisinde boyalarla birlikte fazlaca yardımcı kimyasal maddeler de kullanılmaktadır. Boyaların elyafa absorbe olmasında etkili olan tuz maliyeti de artırmaktadır (Demiral, 2008). En güçlü boyar madde-elyaf bağlanması, boya ve elyafın zıt yüklere sahip olduğu elektrostatik etkileşimler ile kovalent bağ oluşturma sonucunda gerçekleşmektedir (Welham, 2000).

#### 1.4. LİTERATÜR TARAMASI

Bu başlık altında, tez çalışmasının içeriğine uygun olan ve bilimsel olarak tezi destekleyecek nitelikteki endüstriyel atıkların hafif beton üretiminde kullanılabilişine yönelik literatürdeki çalışmalar özetlenmiştir.

Aldakshe vd. (2020) yaptıkları çalışmada pomza agregası ve bor atığını (%1, 3, 5, 7 ve 9) agregalara farklı oranlarda ikame ederek HB üretimi hedeflediler. İlk, %90 pomza agregası ve %10 kum (basınç dayanımını arttırmak için) kullanarak (Referans numune HB üretimi, sonra pomza agregasına %1, %3, %5, %7 ve %9 oranında bor atığı kullanarak katkılı HB ürettirler. Mekanik ve fiziksel deneyler gerçekleştirdiler. Sonuç olarak, HB'lere bor ikame oranının artması ile betonların fiziksel ve mekanik özelliklerinde olumlu gelişme olduğunu ve zararlı bor atıklarının inşaat sektöründe kullanılmasının dönüştürülerek sürdürülebilirliğe katkı sağlayacağını tespit etmişlerdir.

Alqahtani vd. (2017) yaptıkları çalışmada, hafif betonda volkanik hafif agrega ve Lytag(yapay hafif agr.) agregasının yerine üretilen plastik agregayı ikame olarak kullandılar. İkame oranının artmasıyla birlikte çökme, basınç dayanımı, eğilme dayanımı, yarmada çekme dayanımı ve elastisite modülü değerlerinin azaldığını ayrıca taze ve sertleşmiş yoğunluk değerlerinde önemli ölçüde etkilenmediğini buldular. Lytag ve geleneksel hafif beton karışımlarında kırılma esnasında plastik agregalı beton daha sünek davrandığını buldular. Sonuç olarak, üretilen plastik agregayı %25 oranında değiştirme seviyesinde içeren beton karışımının, orta düzeyde dayanım ve süneklik gerektiren yapısal ve yapısal olmayan uygulamalarda kullanılabileceğini kanıtladılar.

Arıcı (1997) yaptığı tez çalışmasında, Van yöresindeki tüflerin betonda kullanılabilişini araştırmıştır. Deneylerde agrega hacmi sabit tutulmak suretiyle tüf miktarlarında değişiklik yapılmıştır. Ürettiği beton numunelerine gerçekleştirdiği mukavemet testlerinden elde edilen sonuçlarda, basınç dayanımlarının %10 artarak C14-16 aralığında tespit etmiştir.

Aslam vd. (2015) yaptığı çalışmada, palmiye yağı endüstrisinden elde edilen iki atık malzeme Palmiye yağı kabuğu (OPS) ve palmiye yağı kazanı klinkerini (OPBC) yüksek mukavemetli, dayanıklı hafif beton üretmek için kaba agrega olarak kullandı; OPS agregaları kısmen OPS hafif agregalı betonda %0 ila 50 oranında palmiye yağı kazanı klinkeri (OPBC) agregalarıyla değiştirdi. Yeşil hafif betonun işlenebilirlik, yoğunluk, sekiz farklı kür koşulu altında basınç dayanımı, yarmada çekme ve eğilme dayanımları, elastisite modülü ve su emme gibi özelliklerini araştırdı. Sonuçlar, palmiye yağı endüstrisinden gelen yüksek hacimli atık

hafif agregaların birleştirilmesiyle çevre dostu ve yüksek dayanımlı yapısal hafif agregalı beton üretmenin mümkün olduğunu tespit etti.

Beycioğlu vd. (2005)'te yaptıkları çalışmada, 350 doz çimento ile pomza agregalı ve silis dumanı ikameli hafif beton numuneler üzerinde çökme, basınç dayanımı ve ultrases geçiş hızı deneyleri yaptılar. Sonuç olarak silis dumanı ikamesi betonların çökme değerini azaltarak işlenebilirliğini olumsuz etkilediğini, basınç dayanımının ise %15 ikame miktarına kadar arttığını (16-20,2 MPa aralığında) buldular.

Bogas ve Cunha (2017) çalışmaları, volkanik cürufra üretilen yapısal olmayan hafif betonun bina zeminlerindeki uygulabilirliğini araştırdılar. Üretilen hafif betonu, genişletilmiş kil ve genişletilmiş polistiren agregalı geleneksel yapısal olmayan hafif beton ile karşılaştırmış ve daha yüksek yoğunluğa, az düşük aşınma direncine ve termal iletkenliğe sahip olduğunu buldular. Ayrıca geleneksel yapısal olmayan hafif beton kıyasla benzer mekanik mukavemet, daha az büzülme ve yüksek sıcaklıklarda daha iyi davranış gösterdiğini tespit etmişlerdir.

Çimen (2023) yaptığı tez çalışmasında, volkanik BT atıkları kullanarak silika aerogel sentezleyerek ve belirli oranlarda betona ikame ederek HB üretti. Ürettiği HB'lere mikro yapı analizleri yaparak ısı, ses vb. mühendislik özelliklerini araştırdı. Sonuç olarak, SA'nın ikame oranının artması ile betonda çoklu kristal yapının arttığını, mekanik dayanımında azalma neden olduğu ve betonun termal durabilitesinde artışın olduğunu tespit etmiştir.

Erdem vd. (2016) kağıt fabrikası atığı olan lignin liköründen elde edilen saf lignini, çimentodaki toksik Cr VI'nın giderimi için kullandılar. Ligninin %0,5 seviyelerinde, açık havadan ve yüksek ısıdan çok iyi saklanmak şartıyla çimentoda katkı maddesi olarak kullanıldığında Cr (VI)'yı istenen standart (2 ppm) seviyesine indirgediği, ayrıca bu miktarların çimentonun beton özellikleri üzerinde herhangi bir olumsuz etkiye neden olmadığını belirlemişlerdir.

Erdem vd. (2024) yaptıkları çalışmada, halen piyasada yoğun olarak RBM'lerin (Reaktive Yellow 37, Reaktive Turkuaz Blue 21, Reaktive Brill Blue 220, Reaktive Navy Blue 250) portland çimentosu hidrasyonuna etkileri ve çimento katkı maddesi olarak kullanılabilirliğini araştırdılar. Bu amaçla çimentolarda karışım suyuna çeşitli oranlarda RBM'leri katarak çözeltiler hazırladılar. RBM'lerin, portland çimentosunun hidrasyonu üzerindeki etkilerini fiziksel testler ve DSC-TG-DTG, FT-IR ve X-ışını kırınım teknikleri kullanarak belirlediler. Sonuç olarak, çimentoya eklenen boyarmaddenin moleküler büyüklük ve yapıya bağlı olarak çimento su/çimento oranını düşürdüğü (%2-7) ve basınç dayanımını (%8-13) arttırdığı, ayrıca çimento hidrasyonuna olumsuz bir etkisi olmadığını tespit ettiler.

Eser 2014'te yaptığı tez çalışmasında, Erzincan ham perlitli kullanarak  $315 \text{ kg/m}^3$  çimento dozajında ve perlit tozunu puzolan olarak değişik oranlarda ikame ederek yüksek dayanımlı (28 ve 90 gün sırası ile; 57 - 61,8MPa) hafif beton üretti. Sonuç olarak, ikame oranının artması ile dayanımların düşmesine rağmen kür süresinin uzaması ile dayanımların sürekli arttığını buldu.

Frahat vd. (2024) çalışmasında, inşaatlarda geri dönüştürülmüş plastik malzemelerden üretilen sentetik tekstil elyaflarının atıklarını ve patlamış mısır agregası kullanarak %100 çevre dostu, eko-yeşil yapısal hafif beton geliştirmeyi hedeflemişlerdir. İnce ve kaba patlamış mısır agregasını %25, %50 ve %100 hacimce ince ve iri doğal agreganın yerin ikame yaparak üretilen hafif betonlara fiziksel, mekanik ve mikro yapı analizleri yapmışlardır. Sonuç olarak, ikame oranı artması ile çökme değeri artmış, birim ağırlığında ve basınç dayanımında gözle görülür azalma olduğunu tespit etmişlerdir.

Heniegal vd. (2024) çalışmasında, dolomit ve kum agregalarını endüstriyel atıklarla (plastik atık ve geri dönüştürülmüş tuğla) değiştirerek yapısal hafif beton üretmeyi hedeflemiştir. Kaba agregayı ikame olarak plastik atıklarla, ince agregayı da ikame olarak atık tuğlalarla değiştirerek fiziksel ve mekanik deneyler yapmıştır. Sonuç olarak, agreganın değiştirilmesi hafif betonun yoğunluğunu  $1400 \text{ kg/m}^3$ 'e ve basınç dayanımı 33,8 MPa'la kadar düşürdüğünü ve karbon emisyonlarını %2,05'e kadar azalttığını basınç dayanımının kuru yoğunlukla doğrudan, emicilik ve geçirgenlikle ters orantılı olduğunu tespit etmiştir.

Karaduman (2023) yaptığı tez çalışmasında, agregaya  $D_{\max}=10 \text{ mm}$  zeolit ikamesi çimentoya da  $40 \mu$ 'a kadar öğütülmüş zeolit kullanılarak hava sürükleyici katkı/katkısız numunele üretti. Tüm serilerde su/çimento oranı 0,5 ve  $350 \text{ kg/m}^3$  çimento dozajı sabit tutulmuş. Numunelere basınç ve eğilme dayanımı ve donma çözülme deneyleri gerçekleştirmiştir. Sonuçta  $D_{\max}=10 \text{ mm}$  zeolit boşluklu yapısından dolayı numunelerin basınç dayanımlarında ciddi oranlarda azalmalar meydana geldiğini, yapının kullanım amacına göre karışım içerisinde %5 ve %10 oranında öğütülmüş zeolit kullanılmasının numunelerin dayanımlarını ve donma çözümlerini iyileştirdiğini buldu.

Kılıçaltan ve Demir (2021) Çanakkale-Ayvacık yöresi volkanik tuf agregası ve genleştirilmiş perlit kullanılarak hafif blok ürettirler. Bu amaçla farklı reçeteler kullanılarak üretilen hafif blok numunelerinin 7, 14 ve 28 günlük Birim Hacim Ağırlık (BHA) , basınç dayanımı (BD) ve kapiler su emme (KSE) gibi teknik özellikleri incelediler. Sonuç olarak, BHA:  $1208 \text{ kg/m}^3$ , BD: 11,80 MPa ve KSE:  $1,11 \text{ kg/m}^2\text{dak}^{0,5}$  bularak, Çanakkale-Ayvacık yöresi volkanik tuf agregalarının hafif yapı malzemesi olarak kullanılabileceği belirlemişlerdir.

Kusin vd. (2020) yaptıkları çalışmada, 38 ve 75 mikron altındaki malzemede karbonatlaşmanın farkını araştırdılar. Sonuçta 38 mikrondan daha düşük malzemede daha fazla karbonatlaşma olduğunu tespit ettiler.

Mahmmud vd. (2024) yaptıkları çalışmada, çevre dostu geri dönüştürülmüş hafif beton üretmek için atık gaz beton ile kil tuğla agregalarını kullandı. Ek olarak hafif genişletilmiş kil agregasının olumsuz etkisini araştırdılar. Taze betona; çökme, kuru yoğunluk, 3, 7, 28 ve 56 günlük serbest basınç dayanımı ve yarmada çekme deneyleri yaparak değerlendirdiler. Sonuç olarak, kullanılan atıkların kaba agregası olarak hafif beton üretiminde değerlendirilebileceğini tespit ettiler.

Matveeva vd. (2024), hafif betonun rasyonel bileşimlerini belirlemek için hafif beton dayanımının beton yoğunluğuna ve agregası yoğunluğuna bağımlılığının yanı sıra hafif beton dayanımının kaba agregası hacim konsantrasyonuna ve agregası dayanımına bağımlılığına ilişkin ampirik denklemler oluşturdular. Gözenekli agregası modifiye zeolit-alkali karışımı kullanılarak B15 ila B27,5 arası mukavemet sınıflarına sahip, 150 donma direncine sahip yapısal hafif beton üretme olasılığını gösterdiler.

Mijan vd. (2024) yaptığı çalışmasında, hafif beton üretmek için hem kaba hem de ince genişletilmiş kil agregası ve ince agregası olarak pomza olmak üzere iki tip hafif agregası kullanmıştır. Kömür atığını da çimentoya ikame olarak kullanmıştır. Sonuç olarak, kumun kısmi ikamesi olarak pomza ve kaba agregası olarak genişletilmiş kil agregası kullanımının uygulanabilir hafif beton üretiminde uygun olduğunu ve yapısal hafif agregalı beton üretmek için kullanılabileceğini tespit etmiştir. Genleştirilmiş kil agregası hem ince hem de kaba agregası biçimindeki karışımların en iyi sonuç verdiğini bulmuştur. Ayrıca sonuçlar, kömür atıklarının çimentoya yaklaşık c hafif betonun özelliklerini iyileştirdiğini göstermiştir.

Nakaria (2015) yaptığı çalışmada, çimentolu kumun (harç) karbonatlanmasının beton mukavemetine etkisi araştırdı. Çimentoyla karıştırılmış silis kumu örneklerini üç koşul altında kürledi. Kapalı ortam (kontrol), doğal ve hızlandırılmış karbonatlaştırıcı ortam. Üç kürleme koşulu altındaki CO<sub>2</sub> konsantrasyonlarını sırasıyla %0, %0,03 ve %5 olarak sabit tuttu. Kapalı koşullar altında kürlenmiş numunelerin ölçülen mukavemetleri 28 gün sonra neredeyse sabit kalırken, doğal ve hızlandırılmış koşullar altında kürlenmiş numunelerin mukavemetleri karbonatlaşma nedeniyle 28 günün üzerine çıktığını tespit etti.

Pekgöz ve Tekin (2021) yaptıkları çalışmada, Bayburt yöresine ait zeolitik agregası kullanarak 300 ve 400 kg/m<sup>3</sup> çimento dozajlarında, 0,70 ve 0,45 su/çimento oranları kullanarak yapısal hafif betonlar ürettirler. Üretilen hafif betonlara fiziksel, mekanik ve mikroskobik incelemeler yapmışlardır. Sonuç olarak, 0,45 w/c oranı ve 400 kg/m<sup>3</sup> çimento dozajı ile üretilen

hafif betonun 28 günlük kür sonunda  $1,710 \text{ g/cm}^3$  yoğunluk ve  $30,7 \text{ MPa}$  basınç dayanımı ile %30 daha hafif yapı elde etmişlerdir.

Rafid vd. (2024) çalışmalarında, sürdürülebilir hafif beton elde etmek için iki tür atık malzeme kullandı. %35 oranında işlenmiş hurma tohumu atıklarını hacimce doğal iri agregaya ile ikame ettiler. Hurma tohumlarından elde edilen hemiselülozlarından selülozu çıkarmak için bir işlem olarak kalsiyum hidroksit çözeltisi kullandılar. Daha sonra hurda lastiklerden geri dönüştürülen çelik elyafların farklı hacim oranları (%0,5, 0,75 ve %1) %35 hurma tohumu ile hafif betona eklenerek fiziksel ve mekanik testler gerçekleştirdiler. Sonuç olarak, %35 hurma tohumu içeren ve %1 geri dönüştürülmüş çelik liflerle güçlendirilmiş betonun basınç, çekme ve eğilme dayanımlarında sırasıyla yaklaşık %15,2, %32,6 ve %58,2 oranında artış gösterdiğini ve geçirgenliği %16,1 oranında azalttığını tespit ettiler.

Rafieizonooz vd. (2024) yaptıkları çalışmada, yüksek performanslı hafif beton üretiminde ince agreganın yerine yapay hafif ince agreganın kullanımını araştırdılar. SEM kullanılarak mikro yapı analizi ve XRD kullanılarak kristal faz değerlendirmesini yaptılar. Sonuçta olarak yapay agregaya parçacıklarının keskin kenarlı düzensiz şekli nedeniyle, hafif betonun akışkanlığını azalttığını ayrıca ince agregaya yerine yapay agregaya miktarının artırılmasının hafif betonun hem basınç hem de çekme dayanımını olumsuz etkilediği bulunmuştur.

Sujatha ve Balakrishnan (2024) çalışmalarında, ön işlem görmüş (harç kaplama) ve kırılmış Hindistan cevizi kabukları ile öğütülmüş granül yüksek fırın cürufu kullanarak çevre dostu, yüksek dayanımlı hafif beton geliştirdiler. İşlem görmemiş hindistan cevizi kabuğu agregalı betonu referans kabul ettiler. Kontrol karışımına çimento ağırlığının %5'i, %10'u, %15'i ve %20'si oranlarında kısmen GGBFS ikame ettiler ve optimum değiştirme yüzdesi %10 olarak buldular. Sonuç olarak ön işlem görmüş Hindistan cevizi kabukları ile üretilen hafif betonların fiziksel ve mekanik özelliklerinin iyileştiğini tespit etmişlerdir.

Şahin (2018) yaptığı tez çalışmasında, Bayburt beyaz taşı (BBT) atıklarının çimento katkı maddesi olarak kullanılabilirliğini araştırdı. Sonuç olarak, BBT toz atıklarının çimento katkı maddesi olarak %20 oranında ikame edilmesi ile kullanılabilirliğini tespit etti.

Şişman vd. (2024) yaptıkları çalışmada, doğal zeolit (Klinoptilolit) kullanarak ürettikleri hafif betonların fiziksel, mekanik ve termal özelliklerini belirleyerek tarımsal yapılarda kullanılabilirliğini araştırmışlardır.  $300 \text{ kg/m}^3$  çimento dozaj ile ürettikleri hafif beton karışımlarına %25, %50, %75 ve %100 oranında doğal zeolit ikame etmişlerdir. 28. gün kür sonunda, basınç dayanımı, birim ağırlığı, su emme oranı, donatı dayanıklılığı ve ısı iletkenlik katsayılarını araştırdılar. Sonuç olarak, üretilen hafif betonların basınç dayanımlarının 13,6-

23,5 MPa arasında, birim ağırlıkların 1500-1900 kg/cm<sup>3</sup> arasında değiştiğini belirlediler. Üretilen tüm hafif betonlar dona dayanıklı çıkarken, su emme oranlarının %8 in altında kaldığı görüldü. Ayrıca üretilen hafif betonları ısı iletkenlik katsayılarının 0,5-0,8 kcal/m°C arasında değiştiği belirlendi. Sonuç olarak, doğal zeolit, hafif beton üretiminde dayanım, dayanıklılık ve ısı yalıtımı açısından tarımsal yapılarda kullanılabilecek potansiyelde bir malzeme olduğu sonucuna varmışlardır.

Tekin vd. (2020) yaptıkları çalışmada, atık BBT agregaları kullanarak hafif duvar elemanları üretimi gerçekleştirmişlerdir. Yaptıkları çalışmada, 150 ile 250kg/m<sup>3</sup> dozajlarda ve farklı süper akışkanlaştırıcılar kullanarak, 28 günlük dayanımları 4-11,6 MPa arasında değişen betonlar üretmişler, 150kg/dm<sup>3</sup> dozaj ile de hafif beton üretilebilmesine rağmen donma çözülme etkisi için, 250kg/dm<sup>3</sup> dozajın daha uygun olduğunu belirlemişlerdir.

Ulus (2007) yaptığı çalışmada; Fuller agrega granülometrisi kullanarak ve Dmax 12,5mm olacak şekilde, ham perlit agregası ile yüksek dayanımlı hafif beton üretiminde, 450-600 kg/m<sup>3</sup> arasında değişen dozajlarda çimento ile çelik lif ve süper akışkanlaştırıcı kullandı. 660 kg/m<sup>3</sup> dozaj ile 110 MPa dayanıma sahip ve birim hacim ağırlığı 1830-1915 kg/m<sup>3</sup> arasında değişen hafif beton beton üretti.

Yılmaz (2024) yaptığı tez çalışmasında, Nevşehir bölgesi pomza ve pirinç kabuğu külünün HB üretiminde kullanılabilirliğinin araştırmıştır. Karışıma %90 Nevşehir pomzası ve %10 oranında kum agrega olarak eklemiştir. Ayrıca %10, %20, %30 pirinç kabuğu külünü çimento ikame malzemesi olarak HB üretiminde bağlayıcı olarak kullanmıştır. Sonuçta pirinç kabuğu külü ikamesinin artmasıyla basınç dayanımı ve yarmada çekme dayanımında artış meydana geldiğini ve pirinç kabuğu külü ikamesinin hafif beton üretimine rahatlıkla kullanılabileceğini tespit etmiştir.

## İKİNCİ BÖLÜM

### 2. MATERYAL VE YÖNTEM

#### 2.1. MATERYAL

Tez kapsamında gerçekleştirilen deneyler ile kullanılan metot, malzeme ve cihazlar bu bölümde kapsamlı şekilde açıklanmıştır.

##### 2.1.1. Agregas

Deneylerde kullanılan agregalar; perlit, pomza, Bayburt beyaz taşı (BBT) ve Bayburt sarı taşı (BST)'dir.

##### 2.1.1.1. Perlit

Deneylerde kullanılan ham perlit, Mollaköy/Erzincan mevkiinden çıkarılmış olup Erzincan'da faaliyet gösteren PERSAN işletmesinden temin edildi. Perlit agregasına ait kimyasal ve minerolojik analiz sonuçları Tablo 4'te, fotoğraflar Şekil 20'de, fiziksel özellikler ise Tablo 5'te verilmiştir. Maksimum tane boyutu ( $D_{max}$ ) 16mm olan perlit madeninin büyük bir çoğunluğu (%90) 11,2 mm'lik elekten geçmektedir.



Şekil 20: Mollaköy/Erzincan Perlit Agregası

Tablo 4: Perlit Agregası Kimyasal Analiz Sonuçları MTA (Akt. Uluşu, 1997)

| Oksit Değerleri                | MTA (%) | Genel Perlit, (%) |
|--------------------------------|---------|-------------------|
| SiO <sub>2</sub>               | 74, 60  | 71-75             |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 13,20   | 12,50-16          |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0,48    | 0,30-0,50         |
| FeO                            | 0,130   | 0,33              |
| MgO                            | 0,018   | 0,03-0,02         |
| TiO <sub>2</sub>               | 0,027   | 0,01              |
| CaO                            | 0,75    | 0,40-0,8          |

|                               |       |         |
|-------------------------------|-------|---------|
| Na <sub>2</sub> O             | 3,10  | 3,20    |
| K <sub>2</sub> O              | 3,140 | 4-5     |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | 0,004 | 0,00375 |
| Kızdırma Kaybı(%)             | 2,37  | 2,502   |

**Tablo 5:** Mollaköy/Erzincan Perlit Agregası Fiziksel Özellikleri

|                                     | Perlit                                                                              |       |           |
|-------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------|-----------|
|                                     | 4-11,2mm                                                                            | 2-4mm | 0,063-2mm |
| Kuru Yoğ.,(g/cm <sup>3</sup> )      | 1,85                                                                                | 1,99  | 2,18      |
| DYK Yoğ.,(g/cm <sup>3</sup> )       | 1,94                                                                                | 2,06  | 2,19      |
| Gör. Tane Yoğ.,(g/cm <sup>3</sup> ) | 2,03                                                                                | 2,15  | 2,21      |
| 24 saatlik Su Emme, %               | 4,60                                                                                | 3,63  | 0,59      |
| Sertlik (mohs)                      | 5-6                                                                                 |       |           |
| Gevşek BHA                          | Genleştirilmiş: 320-400 kg/m <sup>3</sup> ve ham perlit: 960-1200 kg/m <sup>3</sup> |       |           |
| Özgül ısı: 0,2 cal/g°C              | Isı iletkenliği 0,04 w / mK                                                         |       |           |

#### 2.1.1.2. Pomza

Çalışmada kullanılan pomza agregası, Erzincan ilinin Üzümlü ilçesinden çıkarılmış olup Erzincan'da hafif beton elemanları üretimi yapan ERKALEBİMS Fabrikası'ndan temin edildi. Erzincan Pomza agregalarına ait puzolanik aktivite değeri 8,38 MPa'dır. Erzincan pomzasına ait görünüm Şekil 21'de, kimyasal analiz sonuçları Tablo 6'da, fiziksel özellikleri ise Tablo 7'de verilmektedir.



**Şekil 21:** Erzincan Bazik Pomza Agregaları

**Tablo 6:** Erzincan Pomzası Kimyasal Analizi (Ulus, 2008)

| Bileşenler, (%)                | Erzincan Pomza |
|--------------------------------|----------------|
| Na <sub>2</sub> O              | 4,39           |
| MgO                            | 6,30           |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 15,96          |
| SiO <sub>2</sub>               | 58,44          |
| SO <sub>3</sub>                | 0,04           |

|                                |      |
|--------------------------------|------|
| K <sub>2</sub> O               | 2,64 |
| CaO                            | 5,20 |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 4,69 |
| Kızdırma Kaybı                 | 3,02 |
| Özgül Ağırlık                  | 2.50 |

**Tablo 7:** Erzincan Pomzası Fiziksel Özellikler

| Yoğunluklar                         | 4-11,2 mm | 2-4 mm | 0,063-2 mm |
|-------------------------------------|-----------|--------|------------|
| KBHA, (g/cm <sup>3</sup> )          | 1,35      | 1,77   | 2,46       |
| DBHA, (g/cm <sup>3</sup> )          | 1,62      | 1,96   | 2,51       |
| Gör. Tane Yoğ.,(g/cm <sup>3</sup> ) | 1,85      | 2,18   | 2,57       |

#### 2.1.1.3. Bayburt sarı taşı/tüfü (BST)

BST agregası Bayburt ilinde faaliyet gösteren GÜLHAN taş işletmesinden temin edildi. BST agregalarına ait resimler Şekil 22’te, fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri Tablo 8’de, verilmiştir.

**Tablo 8:** BST’nin Kimyasal, Fiziksel ve Mekanik Özellikleri (Şahin, 2018)

|                                                        | BST   |
|--------------------------------------------------------|-------|
| Özgül A.,(Blok)                                        | 2,71  |
| Sertlik, (Mohs)                                        | 2-3   |
| BHA, (g/cm <sup>3</sup> )                              | 1,84  |
| Basınç Day., (MPa)                                     | 27,7  |
| Eğilme Day., (MPa)                                     | 5,9   |
| Ort. Aşınma Day.,(cm <sup>3</sup> /50cm <sup>2</sup> ) | 63,6  |
| BST Oksit Değerleri                                    |       |
| SiO <sub>2</sub>                                       | 70,37 |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                         | 11,01 |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                         | 0,83  |
| CaO                                                    | 2,87  |
| MgO                                                    | 0,87  |
| SO <sub>3</sub>                                        | 0,15  |
| Na <sub>2</sub> O                                      | 1,36  |
| K <sub>2</sub> O                                       | 1,79  |
| Topl. Alkali                                           | 2,54  |
| Toplam                                                 | 99,33 |
| Kız. Kaybı                                             | 10,08 |



**Şekil 22:** BST Agregaları

#### 2.1.1.4. Bayburt Beyaz Taşı/Tüfü (BBT)

Çalışmada kullanılan BBT atık agregaları, Bayburt ilindeki iki ayrı taş işletmesinden temin edildi. BBT agregası ŞİMŞEK, Yeşil Benekli BBT (YBBT) agregası ise TOPYAY taş işletmelerinden temin edildi. BBT kimyasal analiz sonuçları ve mekanik özellikleri Tablo 9’da verilmiştir. Öğütülmüş ve öğütülmemiş BBT ve YBBT taşları Şekil 23’te gösterilmiştir.

**Tablo 9:** BBT’nin Fiziksel ve Mekanik Özellikleri (Şahin, 2018)

|                                | BBT   |
|--------------------------------|-------|
| Özgül A.,(blok)                | 2,37  |
| Sertlik, (Mohs)                | 4-5   |
| BHA, (g/cm <sup>3</sup> )      | 1,7   |
| Basınç D., (MPa)               | 47    |
| Eğilme D., (MPa)               | 12,3  |
| SiO <sub>2</sub>               | 68,92 |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 1196  |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0,34  |
| CaO                            | 3,85  |
| MgO                            | 1,29  |
| SO <sub>3</sub>                | 0,21  |
| Na <sub>2</sub> O              | 0,23  |
| K <sub>2</sub> O               | 2,38  |
| Topl. Alkali                   | 1,8   |
| Toplam                         | 99,31 |
| Kız. Kaybı                     | 10,13 |



**Şekil 23:** BBT ve YBBT Agregaları

### 2.1.2. Çimento

Tüm beton karışımlarında kullanılan çimento CEM I PÇ 42,5 R tipinde olup TS- EN 197-1'e uygun olarak Aşkale Çimento Fabrikası'ndan edinildi. Aşkale Çimento Fabrikası fiziksel ve kimyasal analiz değerleri Tablo 10'da verilmiştir.

**Tablo 10:** Çimentonun Kimyasal ve Fiziksel Analiz Sonuçları

| Kimyasal Analizler             | Sonuçlar | Fiziksel Analizler                 | Sonuçlar |
|--------------------------------|----------|------------------------------------|----------|
| SiO <sub>2</sub>               | 19,41    | 32 mik. elek üstü, %               | 10,9     |
| Çözünmeyen Kal.(max%5)         | 0,97     | 90 mik. elek üstü, %               | -        |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 4,49     | Özgül Y. (Blain)cm <sup>2</sup> /g | 3370     |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 3,25     | Özgül Ağırlık                      | 3,12     |
| CaO                            | 63,7     | Su İhtiyacı, %                     | 29,1     |
| MgO                            | 1,41     | Hacim genleşmesi (mm)              | 3        |
| SO <sub>3</sub> (max.4)        | 2,56     | Priz Başl., dk                     | 170      |
| Na <sub>2</sub> O              | 0,49     | Priz sonu, dk.                     | 230      |

|                            |        |                     |          |
|----------------------------|--------|---------------------|----------|
| K <sub>2</sub> O           | 0,64   | Mekanik Analizler   |          |
| Cl <sup>-</sup> (max. 0,1) | 0,0117 | Basınç day. (2 gün) | 26 MPa   |
| Serbest CaO                | 1,68   | Basınç day. (7gün)  | 52,6 MPa |
| Kızdırma kaybı             | 3,52   |                     |          |

### 2.1.3. Karışım Suyu

Beton karışım suyu olarak Bayburt ili şehir şebeke suyu ( pH 8-9) kullanıldı.

### 2.1.4. Kimyasal Katkı

TS EN 934-2'ye uygun olarak tez çalışmasında kullanılan katkılar; Lignosülfonat (iki farklı firmadan), naftalinsülfonat, polikarboksilat ve polimer organik asit esaslı katkı olmak üzere toplam beş çeşittir. Kullanılan katkılara ait bilgiler Tablo 11'de verilmiştir.

**Tablo 11:** Kullanılan Akışkanlaştırıcılar ve Fiziksel Özellikleri

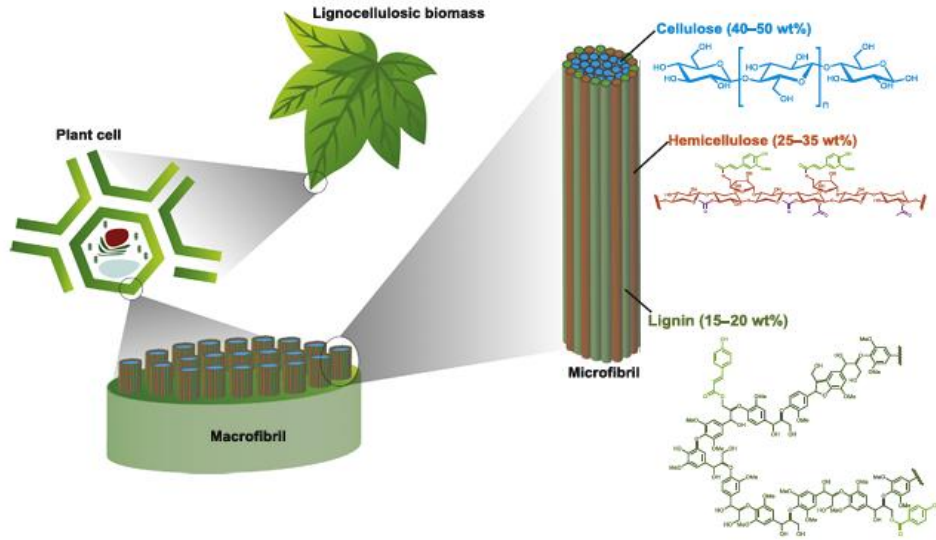
| Akış. Tipi    | Yoğ.,<br>(gr/cm <sup>3</sup> ) | pH  | Alkali içeriği<br>(TS EN 480-12) | Akışkanlaş. Esası /<br>Nesil   | Üretici Firma              |
|---------------|--------------------------------|-----|----------------------------------|--------------------------------|----------------------------|
| İksaplast 29  | 1,13                           | 7,5 | ≤ %10                            | Lignosülfonat, NA/1.<br>nesil  | İKSA Beton ve Yapı<br>Kim. |
| İksaplast 900 | 1,12                           | 7,5 | ≤ %12)                           | Naftalin sülf., NA/2.<br>nesil | İKSA Beton ve Yapı<br>Kim. |
| Polycar 300   | 1,07                           | 7,5 | ≤ %10                            | Polikarboksilat SA/3.<br>nesil | İKSA Beton ve Yapı<br>Kim. |
| Reoplast 1100 | 1,18                           | 7,5 | ≤ %10                            | Polimerorganik SA/3.<br>nesil  | İKSA Beton ve Yapı<br>Kim. |
| MP 3094       | 1,13                           | -   | ≤ %10                            | Lignosülfonat, SA/1.<br>nesil  | BASF                       |

### 2.1.5. Katı Lignin

Çalışmada kullanılan katı lignin; Zonguldak ilindeki OYKA Kağıt Fabrikası'ndan temin edilen atık siyah lignin likörünün çöktürülmesi ile elde edildi (Erdem vd., 2016). Kurutulan katı lignin kullanım gününe kadar saklandı. Kullanılan Lignin Lükörüne ait bilgiler Tablo 12'de, katı ligninin yapısı Şekil 24'te verilmektedir.

**Tablo 12:** Kullanılan Lignin Lükörünün Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

| Akış. Tipi    | Yoğ.,<br>(gr/cm <sup>3</sup> ) | pH  | Alkali içeriği<br>(TS EN 480-12) | Akışkanlaş. Esası /<br>Nesil | Üretici Firma |
|---------------|--------------------------------|-----|----------------------------------|------------------------------|---------------|
| Lignin lükörü | 1,3-1,5g/cm <sup>3</sup>       | 8,5 | %10                              | -                            | OYKA Kağıt F. |



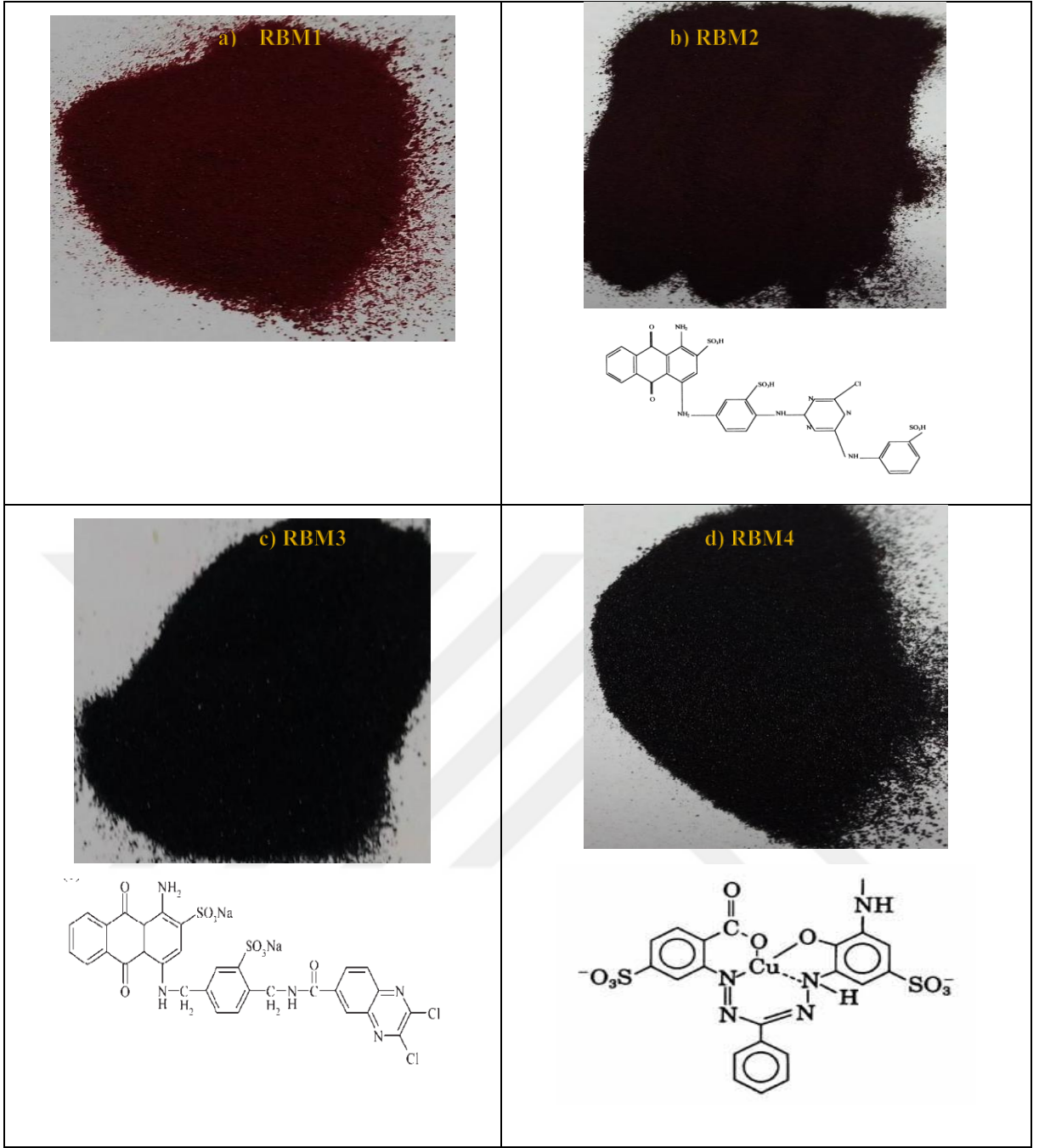
**Şekil 24:** Ligninin Yapısı (Bertella & Luterbacher, 2020)

### 2.1.6. Reaktif Boyar Maddeler (RBM)

HB karışımlarında akışkanlaştırıcı/su azaltıcı katkı olarak olarak dört farklı RBM kullanıldı. HB karışımlarında kullanılan RBM'lere ait bilgiler Tablo 13'te verilmektedir. Şekil' 25'te ise RBM'ler ve kimyasal yapıları verilmiştir.

**Tablo 13:** HB Üretiminde Kullanılan RBM'lere Ait Kimyasal Özellikler ve Ticari Adları

| Katkı tipi | Formül                          | Mol. Ağ.<br>(g/mol) | Çözelti<br>pH'ı | Renk        | Kimyasal ad/<br>Firma |
|------------|---------------------------------|---------------------|-----------------|-------------|-----------------------|
| RBM1       | -                               | -                   | 7,5             | Bordo       | Levafix/Dystar        |
| RBM2       | $C_{29}H_{22}ClN_7O_{11}S_3$    | 776,2<br>g/mol      | 7,5             | K. kırmızı  | Levafix/Dystar        |
| RBM3       | $C_{29}H_{15}Cl_2N_5Na_2O_9S_2$ | 758,47<br>g/mol     | 7,4             | K. mavi     | Levafix/Dystar        |
| RBM4       | $C_{22}H_{16}N_2Na_2O_{11}S_3$  | 626,54<br>g/mol     | 7,3             | K. larcivet | Remazol               |



**Şekil 25:** HB Üretiminde Kullanılan RBM'ler b,c (Barghouthi vd., 2007), d ( Aydın, 2023)

## 2.2. METOT

Tez çalışmasında, THB ve TOHB üretiminde kullanılan agregalara ve betonlara uygulanan deneyler ile ilgili standartlar Tablo 14'te özetlenmiştir.

**Tablo 14:** Gerçekleştirilen Deneyler ve İlgili Standartlar

| Deney adı            | Metot-Standart   | Numune | Özellikler |
|----------------------|------------------|--------|------------|
| <b>Agrega</b>        |                  |        |            |
| Tane büyüklüğü dağı. | TS 3530 EN 933-1 |        |            |

|                   |              |                     |                   |
|-------------------|--------------|---------------------|-------------------|
| Yoğunluk-su emme  | TS EN 1097-6 | BBT, BST, Pomza,    | TS 1114 EN 13055- |
| Numune alma       | TS EN 932-1  | Perlit (10×10×10cm) | 1’de istenen      |
| Numune çeyrekleme | TS EN 932-2  |                     | özellikleri       |

#### Taze Beton Deneyleri

|                |                        |            |                                                                          |
|----------------|------------------------|------------|--------------------------------------------------------------------------|
| Karışım hesabı | TS 802 (2016), TS 2511 |            | Sabit Dozaj (400/450 kg/m <sup>3</sup> ) ve su/çimento oranı (0,55/0.50) |
| Çökme (Slump)  | TS EN12350-2           | 10×20×30cm |                                                                          |
| Sıkışık BHA    | TS EN12390-7           | Ø21×20cm   |                                                                          |

#### Sertleşmiş Beton Deneyleri

|                     |                     |            |                             |
|---------------------|---------------------|------------|-----------------------------|
| Basınç day.         | TS EN 12390-3       | 10×10×10cm | 28 gün Üç numune ortalaması |
| Eğilmede çekme day. | TS EN 12390-5       | 7×7×28cm   | 28 gün Üç numune ortalaması |
| Doygun BHA-Su emme  | TS EN 12390-7(2010) | 10×10×10cm | Üç numune ortalaması        |

### 2.2.1. Agrega Deneyleri

#### 2.2.1.1. Agregaların hazırlanması

Deneylerde kullanılan agregalardan nümune hazırlanması, TS EN 932-1 ve TS 707’ye göre gerçekleştirildi. Agregalar blok ve moloz taş olarak işletmelerden getirildikten sonra laboratuvar tipi Yüksel Kaya Makine firmasına ait konkasör makinasında kırıldı ve çeyrekleme yapıldı. Daha sonra TS EN 1097-6, 2013 standardına uygun olarak, 0-2, 2-4 ve 4-11,2 mm boyutlarında üç sınıfa ayrılarak her bir boyut için yoğunluk ve su emme deneyleri yapıldı. Ayrıca TS EN 1097-7’ uygun olarak 0-0,063 mm arası filler malzemenin özgül ağırlık deneyleri piknometre metodu ile gerçekleştirildi. Bu deneylere ait sonuçlar Tablo 15’te toplu halde verilmiştir. Şekil 26’da agregaların hazırlanışına ait resimler verilmektedir.

**Tablo 15:** Agrega Deneyleri Toplu Sonuçları

| BST Yoğunlukları ve Agrega Deneyleri |           |        |        |
|--------------------------------------|-----------|--------|--------|
|                                      | 4-11,2 mm | 2-4 mm | 0-2 mm |
| KBHA (kg/m <sup>3</sup> )            | 2,00      | 2,08   | 2,25   |
| DBHA (kg/m <sup>3</sup> )            | 2,23      | 2,27   | 2,38   |
| Görünür T. BHA (kg/m <sup>3</sup> )  | 2,61      | 2,57   | 2,58   |
| Su emme, %                           | 11,66     | 9,19   | 5,81   |

|                                                |       |                     |       |
|------------------------------------------------|-------|---------------------|-------|
| GBHA, (kg/m <sup>3</sup> )                     | 1,17  | Metot, TS EN 1097-3 |       |
| Filler, (0-0,063)                              | 2,78  |                     |       |
| SBHA, (kg/m <sup>3</sup> )                     | 1,305 | Metot, TS EN 1097-3 |       |
| <b>BBT Yoğunlukları ve Agrega Deneyleri</b>    |       |                     |       |
| KBHA, (kg/m <sup>3</sup> )                     | 1,71  | 1,76                | 1,90  |
| DBHA, (kg/m <sup>3</sup> )                     | 1,97  | 2,01                | 2,10  |
| Görünür T. yoğ., (kg/m <sup>3</sup> )          | 2,31  | 2,35                | 2,37  |
| Su emme, %                                     | 15,14 | 14,34               | 10,37 |
| GBHA, (kg/m <sup>3</sup> )                     | 1,07  | Metot TS EN 1097-3  |       |
| SBHA, (kg/m <sup>3</sup> )                     | 1,14  | Metot TS EN 1097-3  |       |
| Filler(0-0,063)                                | 2,55  |                     |       |
| <b>Perlit Yoğunlukları ve Agrega Deneyleri</b> |       |                     |       |
| KBHA, (kg/m <sup>3</sup> )                     | 1,85  | 1,99                | 2,18  |
| DBHA, (kg/m <sup>3</sup> )                     | 1,94  | 2,06                | 2,19  |
| Görünür T. yoğ., (kg/m <sup>3</sup> )          | 2,03  | 2,15                | 2,21  |
| Su emme %                                      | 4,60  | 3,63                | 0,59  |
| Filler(0-0,063)                                |       |                     |       |
| <b>Pomza Yoğunlukları ve Agrega Deneyleri</b>  |       |                     |       |
| KBHA, (kg/m <sup>3</sup> )                     | 1,35  | 1,77                | 2,46  |
| DBHA, (kg/m <sup>3</sup> )                     | 1,62  | 1,96                | 2,51  |
| Görünür T. yoğ., (kg/m <sup>3</sup> )          | 1,85  | 2,18                | 2,57  |
| Su emme, %                                     | 19,90 | 10,73               | 1,72  |
| Filler(0-0,063)                                | 3,08  |                     |       |



**Şekil 26:** BT Agregalarının Hazırlanması

### 2.2.1.2. Agrega tane büyüklüğü dağılımı

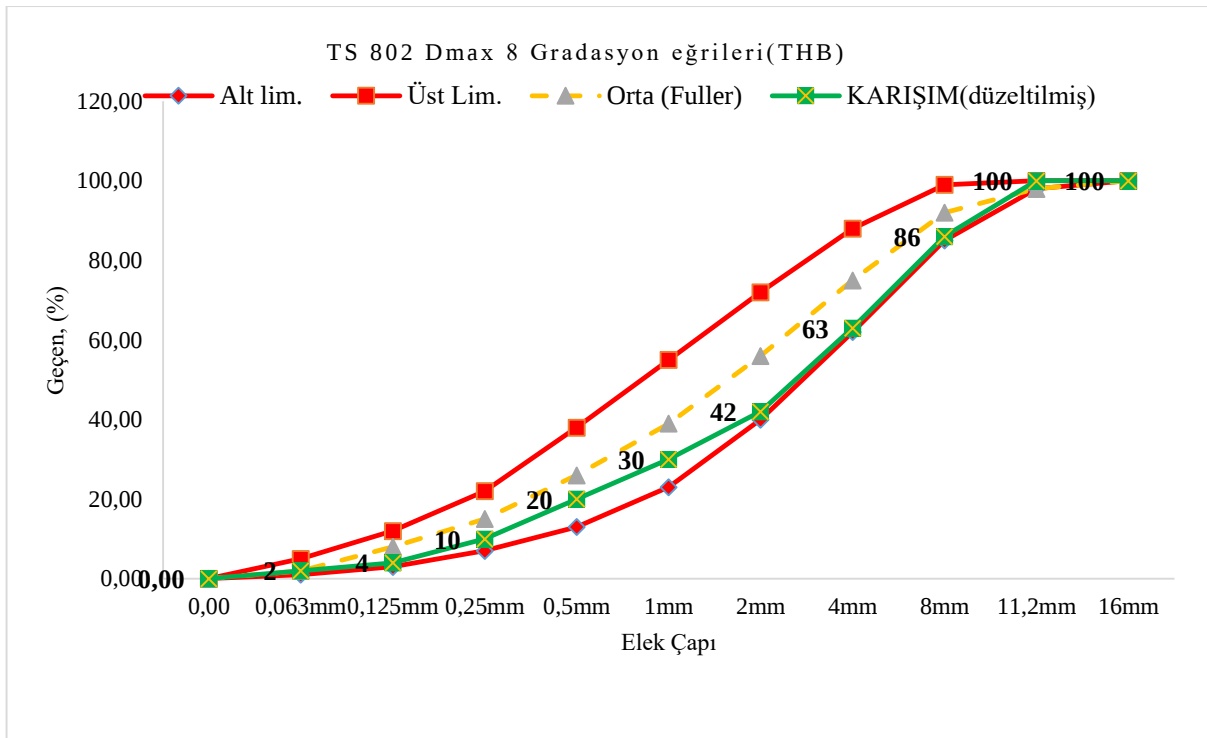
BBT, işletmeden temin edildikten sonra laboratuvarında çeneli kırıcıda Dmax 16mm olacak şekilde kırıldı. TS 3530 ve EN 933-1'e göre tane dağılımı analizi yapılarak % geçen değerler hesaplandı. Tablo 16'da ve Şekil 28'de elek analizi sonuçlarının TS 802 (2016)'ye uyumu gösterilmektedir.

**Tablo 16:** TS 802 (2016)'ye göre THB ve TOHB Üretiminde (Dmax:8mm) % Geçenler

| Elek no | Alt lim. | Üst lim. | Orta | Dmax.(8mm) | Karışım (THB) | Karışım (TOHB) |
|---------|----------|----------|------|------------|---------------|----------------|
| 0,063mm | 1        | 5        | 2    | 7,5        | 2             | 2              |
| 0,125mm | 3        | 12       | 8    | 11,5       | 4             | 4              |
| 0,25mm  | 7        | 22       | 15   | 14,9       | 10            | 8              |
| 0,5mm   | 13       | 38       | 26   | 21,1       | 20            | 14             |
| 1mm     | 23       | 55       | 39   | 29,8       | 30            | 24             |
| 2mm     | 40       | 72       | 56   | 42,25      | 42            | 42             |
| 4mm     | 62       | 88       | 75   | 59,76      | 63            | 63             |
| 8mm     | 85       | 99       | 92   | 84,5       | 86            | 86             |
| 11,2mm  | 98       | 100      | 98   | 100        | 100           | 100            |
| 16mm    | 100      | 100      | 100  | 100        | 100           | 100            |

#### THB üretiminde kullanılan agrega granülometrisi

BBT ve BST agregalarının maksimum tane çapını belirlemek ve piyasada hali hazırda hafif yapı elemanlarının üretiminde kullanılan agregalarla karşılaştırma yapabilmek için perlit agregasının en büyük tane çapı olan 11,2 mm maksimum tane çapı olarak belirlendi. Şekil 27'de THB üretiminde kullanılan agregaların gradasyon eğrileri gösterilmektedir (Dmax11,2mm, TS 802 ve Fuller eğrisine uyumu).



**Şekil 27:** THB Üretiminde Kullanılan Agregaların Granülometri Eğrileri (Dmax11,2mm, TS 802 ve Fuller Eğrisine Uyum)

TS 2511 ve TS 802 standartlarına göre yapılan hesaplamalarda; THB karışım oranlarına göre % geçen değerler; 11,2-4 mm %37, 4-0,063 mm %61 ve 0,063-0 mm %2 olarak belirlendi. 1m<sup>3</sup> THB karışımı için hesaplanan malzeme karışım oranları Tablo 17’de gösterilmektedir.

**Tablo 17:** THB Üretiminde Kullanılan Malzeme Miktarları, (kg/m<sup>3</sup>)

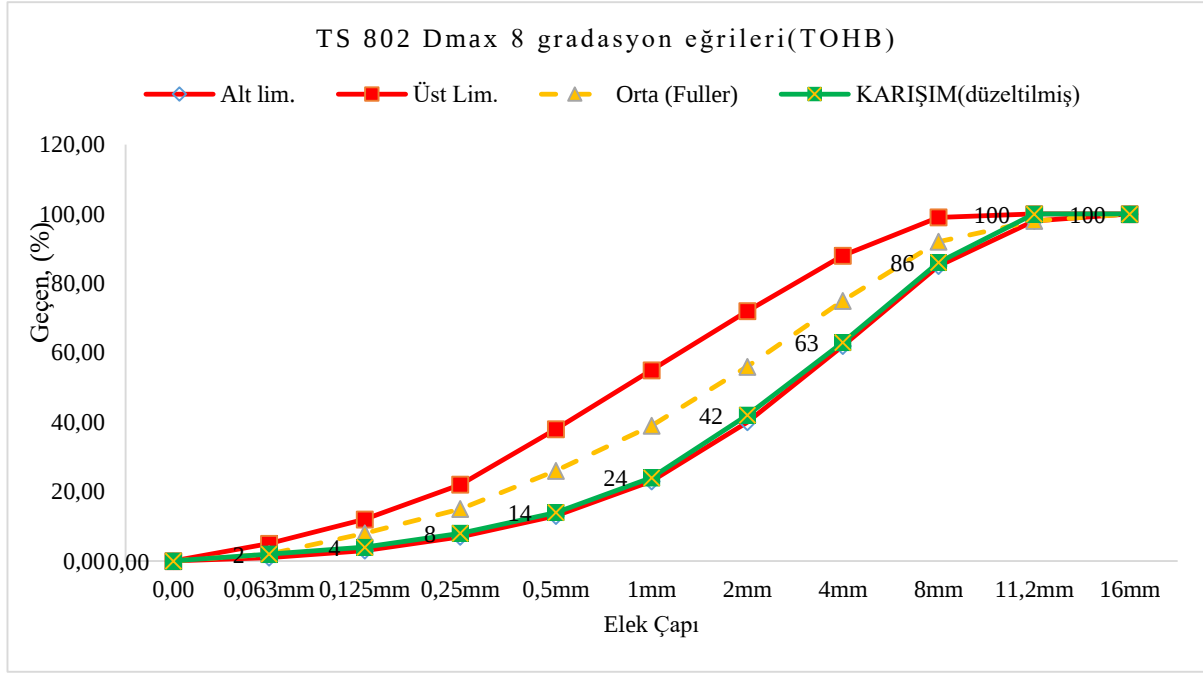
| THB karışımları (450 doz)     |  |         |
|-------------------------------|--|---------|
| Su, (kg/m <sup>3</sup> )      |  | 225     |
| Çimento, (kg/m <sup>3</sup> ) |  | 450     |
| S/Ç                           |  | 0,50    |
| Hava, (dm <sup>3</sup> )      |  | 28      |
| Agrega, (kg/m <sup>3</sup> )  |  | 1205,54 |

| % Geçen Değerler ve Agrega Miktarı, (kg/m <sup>3</sup> ) |         |            |
|----------------------------------------------------------|---------|------------|
| Agrega elekleri, (mm)                                    | % Geçen | Miktar, kg |
| 11,2-8                                                   | 100     | 168,77     |
| 8-4                                                      | 86      | 277,27     |
| 4-2                                                      | 63      | 253,17     |
| 2-1                                                      | 42      | 144,67     |
| 1-0,5                                                    | 30      | 120,55     |
| 0,5-0,25                                                 | 20      | 120,55     |
| 0,25-0,125                                               | 10      | 72,33      |
| 0,125-0,063                                              | 4       | 24,11      |
| 0,063-0                                                  | 2       | 24,11      |

## TOHB üretiminde kullanılan agrega granülometrisi

BBT ile TOHB üretiminde; karışımı oluşturan malzemelerin kuru yoğunlukları da göz önüne alınarak 'D1,6' ( $1,4 \leq D \leq 1,6$ ) yoğunluk sınıfı seçildi. Üretimi hedeflenen TOHB'nin hafif olması esas alınarak ve ilgili standartlara (TS EN 206-1, TS 802 (2016), TS 2511) uygun olarak agrega granülometri eğrisi oluşturuldu. Şekil 28'de yeni oluşturulan agrega granülometrisi, Tablo 18'de TOHB karışımlarında kullanılan 1 m<sup>3</sup> beton için karışım miktarları verilmektedir.



Şekil 28: TOHB Üretiminde Kullanılan Agrega Granülometri Eğrisi

Tablo 18: BBT Kullanılarak Hazırlanan TOHB Karışım Oranları, (kg/m<sup>3</sup>)

| TOHB Üretimi İçin 1 (Bir) m <sup>3</sup> Karışım Miktarları (200 doz) |        |            |
|-----------------------------------------------------------------------|--------|------------|
| Agrega, (kg/m <sup>3</sup> )                                          | 1611,8 |            |
| Su, (kg/m <sup>3</sup> )                                              | 100    |            |
| Çimento, (kg/m <sup>3</sup> )                                         | 200    |            |
| Su/Çimento                                                            | 0,50   |            |
| Hava, (dm <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )                              | 30     |            |
| BBT, 1m <sup>3</sup> Agrega Miktarları                                |        |            |
| Elekler, mm                                                           | %geçen | Miktar, kg |
| 11.2-8                                                                | 100    | 225,63     |
| 8-4                                                                   | 86     | 370,72     |
| 4-2                                                                   | 63     | 338,46     |
| 2-1                                                                   | 42     | 290,14     |

|             |    |        |
|-------------|----|--------|
| 1-0,5       | 24 | 161,16 |
| 0,5-0,25    | 14 | 96,72  |
| 0,25-0,125  | 8  | 64,47  |
| 0,125-0,063 | 4  | 32,23  |
| 0,063-0     | 2  | 32,23  |

### 2.2.1.3. Agregaların yoğunluk ve su emme değerleri tayini

Agregaların yoğunluk ve su emme tayini deneyinde TS EN 1097-6 (2013) EK C standardı esas alındı. Hesaplamalar Eşitlik 2.2.1.3.1. ve 2.2.1.3.2. ile gerçekleştirildi.

$$\text{DYK (Doygun, Yüzey Kuru): } \rho_{Lssd} = \rho_w \times M_1(24h) / (M_1(24h) - (M_2(24h) - M_3)) \quad (2.2.1.3.1)$$

$$24 \text{ saatlik su emme: } W_{LA24} = 100 \times (M_1(24h) - M_4) / M_4 \quad (2.2.1.3.2)$$

$\rho_{La}$  Görünür tane yoğunluğu (megagram/metreküp),

$\rho_{Lrd}$  Etüvde kurutulmuş haldeki tane yoğunluğu (megagram/metreküp),

$\rho_{Lssd}$  Doygun ve yüzeyi kuru haldeki tane yoğunluğu (megagram/metreküp),

$\rho_w$  Deney sıcaklığındaki suyun yoğunluğu (Ek D) (megagram/metreküp),

$M_1(24 \text{ saat})$  24 saat sonra doymuş ve yüzeyi kuru haldeki agregaların atmosferdeki kütlesi (g),

$M_2(24 \text{ saat})$  24 saat sonra piknometre, huni, ızgara (kullanıldı ise), su ve doymuş agregaların kütlesi (g),  $M_3$ : Kalibrasyon işleminden sonra piknometrenin huni, ızgara (kullanıldı ise) ve suyun kütlesi (g),

$M_4$ : Etüvde kurutulmuş deney numunesi kısmının havadaki kütlesi (g),

$W_{AL24}$ : 24 saatlik daldırmadan sonraki su emme oranı (%).

### 2.2.1.4. Agregalarda nem düzenlenmesi

Rutubet düzenlenmesi TS 802 (2016)'ya uygun olarak Eş. 2.2.1.4'e göre yapıldı.

$$\text{Nem düzenlenmesi} = Se - R \quad (2.2.1.4)$$

Burada; Se, belirli bir agregaya ait su emme % değeridir. R ise aynı sınıfa ait agreganın o andaki toplam rutubet içeriğini göstermektedir. Tablo 19'da örnek olarak BBT'ye ait nem düzenlemesi hesapları ve sonrasında oluşan yeni değerler verilmektedir.

**Tablo 19:** BBT'ye Ait Agregada Nem Düzenlemesi

|                                 | 0-0,063 mm | 0,063-4 mm | 4-11,2 mm |
|---------------------------------|------------|------------|-----------|
| Hacimce Ag. Or. (%)             | 2          | 61         | 37        |
| Kuru Yoğ., (g/cm <sup>3</sup> ) | 1,9        | 1,76       | 1,71      |

|                                    |      |      |       |
|------------------------------------|------|------|-------|
| DYK yoğ., (g/cm <sup>3</sup> )     | 2,1  | 2,01 | 1,97  |
| Su emme (Se, %)                    | 10,4 | 15,1 | 18,06 |
| Mevcut Nem (R, %)                  | 4    | 4    | 4     |
| İlave Su Mik. (kg/m <sup>3</sup> ) | 11,8 | 80,5 | 61,7  |

### BBT agregasının, nem düzenlemesi sonrasındaki oluşan yeni kullanım miktarları

| Kullanılan net agrega miktarı, (kg/m <sup>3</sup> ), (*) |                 |            |   |       |
|----------------------------------------------------------|-----------------|------------|---|-------|
|                                                          | 0-0,063mm (%2)  | 23,7-11,8  | = | 11,9  |
| Agrega (kg/m <sup>3</sup> )                              | 0,063-4mm (%61) | 724,3-80,4 | = | 643,9 |
|                                                          | 4- 11,2mm (%37) | 439,3-61,7 | = | 377,6 |

(\*): Hesaplamalar neticesinde, agregaların suya doymun olması için karışımdaki 225kg/m<sup>3</sup> su miktarına 154 kg/m<sup>3</sup> fazla su eklenmesi gerektiği belirlendi. Eklenen fazla su hacmi, toplam hacim sabit olması için agrega ağırlığından çıkarıldı.

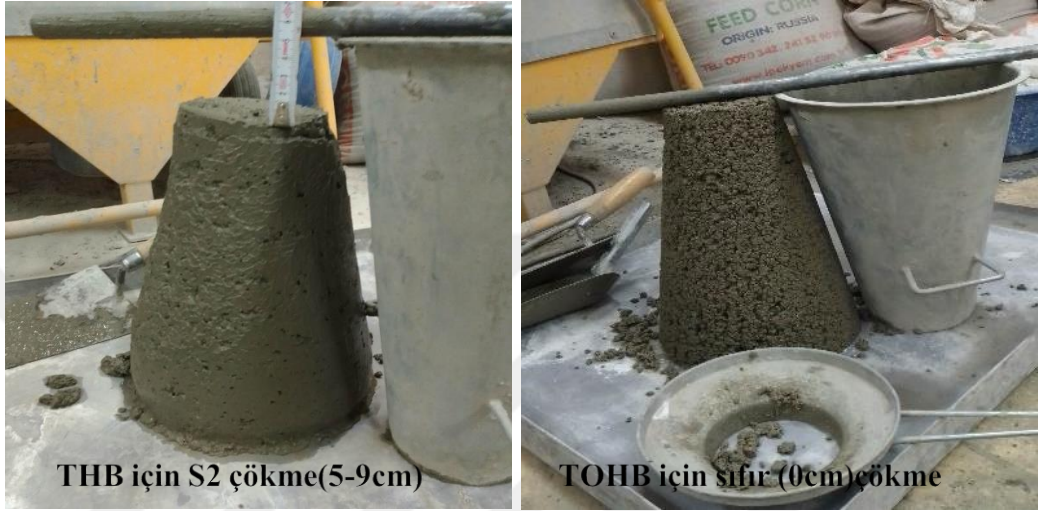
### 2.2.2. HB Karışımlarının Hazırlanması ve Taze Beton Deneyleri

Tez kapsamında taze betonlara, çökme miktarı deneyi ve sıkışık BHA deneyleri olmak üzere iki farklı deney uygulandı. İşletmelerden atık moloz olarak laboratuvara getirilen taşlar konkasörde kırılarak sınıflandırılarak istif edildi. Kütlesi hesaplanan karışım malzemeleri ALFA marka dikey eksenli mikserle sırası ile iri ve ince agregalar şeklinde yerleştirildi. Agregalara 2 saat ön ıslatma yapıldı. Karışım suyunun yarısında katı haldeki katkı çözdürüldü, diğer yarısı karışıma azar eklenerek hedef çökme elde edildi. Çökme (Slump) deneyi TS EN 12350-2'ye göre gerçekleştirildi. Taze betona sıkışık BHA (SBHA) deneyi yapıldıktan sonra 10×10×10cm ebatlarındaki plastik kalıplara iki aşamada döküldü. Her aşamada numunelere Yüksel Kaya Makine'ye ait sarsma aletinde 1,5 dk sarsma uygulandı. Üzerleri nemli kalacak şekilde 24 saat 21-23°C laboratuvar ortamında bekletildikten sonra kalıptan çıkarılan numuneler deney gününe kadar kirece doymun suda kür edildi.

BİMS fabrikalarında pomza ve perlit agregaları ile 150-200 kg/m<sup>3</sup> bağlayıcı dozajında briket üretiliyor olması referans alınarak çalışma kapsamında TOHB üretiminde 200 kg/m<sup>3</sup> çimento dozajı belirlendi. Fabrikalarda kuru karışım -sıfır çökme ile briket üretildiği için tüm TOHB karışımlarında sıfır slump ile üretim gerçekleştirildi. TOHB numunelerine 1,5dk. Sarsma yaptıktan sonra 0,1MPa basınç uygulanarak sıkıştırıldı. Basınç ve eğilme deneyleri Yüksel Kaya Makine Profix-6 model basınç dayanımı cihazı ile gerçekleştirildi.

### 2.2.2.1. Çökme miktarı deneyi (Slump)

Taze betonda çökme miktarı deneyi TS 12350-2 standardına göre gerçekleştirildi. Deney; üst çapı 10cm, taban çapı 20 cm ve yüksekliği 30 cm olan standart slump aletiyle yapıldı. Üç tabaka olacak şekilde yerleştirilen taze beton 25'er adet dairesel ve homojen olacak şekilde şişlenerek yerleştirildi. Sonra slump konisi düşey olarak yukarı yönlü kaldırılarak taze betonun çökme değeri santimetre olarak ölçüldü. Şekil 29'da slump ölçüm işlemi gösterilmektedir.



Şekil 29: THB ve TOHB'lere Uygulanan Çökme Deneyi ve Aleti

#### Sıkışık BHA deneyi (ligninin hava sürüklenme özelliği)

Taze betona TS12390-7'ye uygun olarak sıkışık BHA deneyi gerçekleştirildi. Bu deney ile taze betonda sürüklenen hava miktarı tayin edilmektedir. Bu yöntemde taze betonun yoğunluğu ölçülerek hava içeriği hesaplanır. Sıkışık BHA deneyi TS12390-7'ye göre, göre iç çapı 15 cm ve yüksekliği 15 cm olan 2649,75 cm<sup>3</sup> hacminde deney kabıyla gerçekleştirildi. Deney Karışımlara Karışım deney kabına iki tabaka olacak şekilde yerleştirildi ve her tabaka sarsma tablasında 1,5 dk sarsmak suretiyle sıkıştırıldı. Şekil 30'da sıkışık BHA deneyinin yapılışı verilmiştir. Eşitlik: 2.2.2.1 kullanılarak dolu kabın ağırlığından **(a)** boş kabın ağırlığı **(b)** çıkarılarak elde edilen değerin kabın hacmine (2649,75cm<sup>3</sup>) bölünmesi ile sıkışık BHA değeri hesaplandı.

$$[Sıkışık BHA = (a-b)/V(\text{kabın hacmi})]$$

Eşitlik: 2.2.2.1



**Şekil 30:** Sıkışık BHA Deneyi

Betonun sıkışık BHA değeri, kullanılan malzemelerin yoğunluğuna ve karışım oranlarına bağlı olarak değişir. Genel olarak, aşağıdaki aralıklar kabul edilen değerlerdir: Normal Beton: 2000-2600 kg/m<sup>3</sup>; HB: 2000 kg/m<sup>3</sup> ve altında; ağır Beton: 2600 kg/m<sup>3</sup> ve üzerindedir (Şimşek, 2020). Hafif betonlarda daha az yoğun agregalar kullanılırken, ağır betonlarda daha yoğun ve ağır agregalar kullanılır.

### 2.2.3. Sertleşmiş Beton Deneyleri

Prizini alan ve standart 7, 28 ve daha fazla gün kür yapılan numunelere uygulanan deneylere sertleşmiş beton deneyleri denir. Üretilen THB ve TOHB'lerle; basınç dayanımı, eğilmede çekme, BHA ve su emme deneyleri gerçekleştirildi. Numuneler TS EN 12390-2 standardına göre hazırlandı. Kalıplara dökülen numuneler, %50-65 bağıl neme sahip laboratuvarında 24 saat bekletildi ve daha sonra kalıptan çıkarılarak kirece doymun suda deney gününe kadar küre tabi tutuldu. Şekil 31'de kür edilen bazı numunelere ait resim verilmiştir.



**Şekil 31:** Kür Havuzunda Kür Edilen Numuneler

### 2.2.3.1. Basınç dayanımı

Sertleşmiş betonun basınç dayanımı tayininde, TS EN 12390-3 standardı esas alındı. Laboratuvarında kirece doymun suda bekletilen 10×10×10cm'lik numunelerin dayanımlarının tespitinde, 0,24 kN/sn hız ve 2000 kN kapasitede bulunan Yüksel Kaya Makine'ye ait PROFI X6 model basınç test cihazı (Şekil 32) kullanıldı. Deneyde maksimum yük bulundu. Eşitlik, 2.2.3.1'deki formüle göre dayanım, MPa olarak hesaplandı. Sonuçlar her bir kür zamanı için üç deneyin ortalaması olarak verildi.



Şekil 32: Basınç Dayanımı Ölçümü

$$F_c = F / A_c \quad (2.2.3.1)$$

$F_c$  = Basınç dayanımı, MPa (N/mm<sup>2</sup>)

$F$  = Kırılma anı oluşan en büyük kuvvet, (Newton)

$A_c$  = Numunenin en kesit alanı, (mm<sup>2</sup>)

### 2.2.3.2. Eğilme dayanımı

BBT ve BST agregaları ile üretilen HB numuneler 7×7×28 cm ebatlarındaki kalıplara döküldü. Standart kürleme ile 28. gün kür sonunda TS EN 12390-5'e göre Yüksel Kaya Makine 075 model cihazında eğilmede çekme dayanım testi uygulandı. Deneye ait resim Şekil 33'te verilmiştir. Üç noktalı prizmatik numuneler için eğilme dayanımı eşitlik 2.2.3.2.'de verilmiştir.

$$\sigma_e = 3.F \cdot L / 2b.d^2 \quad \text{Eşitlik 2.2.3.2.}$$

$\sigma_e$  :Betonun eğilme dayanımı, (kgf/cm<sup>2</sup>),  $F$  :Kırılmaya neden olan kuvvet, (kgf);

$L$  :Betonun mesnetler arasındaki mesafe (cm);  $b$ : Betonun genişliği, (cm);  $d$ : Deney numunesinin kalınlığı, (cm).



**Şekil 33:** Betonun Eğilme Dayanımı Ölçümü

### 2.2.3.3. THB'lere uygulanan atmosferik buhar kürü uygulaması

Atmosferik buhar kürü, betonun erken dayanım kazanmasının önemli olduğu yerlerde özellikle ön dökümlü prefabrik elemanların seri üretimlerinin hızlı bir şekilde dayanım kazanarak devam etmesi (Köprü kirişi, vb.) veya hidratasyonun sağlıklı bir şekilde ilerleyebilmesi için gerekli ısıнын olmadığı soğuk iklimlerde fayda sağlamaktadır. Atmosferik buhar kürü genellikle 65-85°C sıcaklık aralığı tercih edilmekte ve 10-15 saat aralığında uygulanmaktadır (Erdoğan, 2015). 30 gün kirece doymun suda bekletilen YBBT agregaları ile üretilen THB numuneleri, 10×10×10cm ebatlarındaki kalıplara döküldü. 24 saat %55-65 nem içeriğine sahip laboratuvar ortamında bekletildikten sonra kalıplardan çıkarılan numunelere atmosferik buhar kürü uygulaması başlatıldı. THB'lere uygulanan atmosferik buhar kürü uygulamasında TS 3648 standardı referans alındı. Uygulamada Nüve Sanayi Malzemeleri İmalat ve Ticaret Aş. firmasına ait BM 402 modelde cihaz kullanılarak atmosferik buhar kürü uygulandı. Şekil 34'te THB'lere uygulanan atmosferik buhar cihazına ait resim verilmiştir.



**Şekil 34:** Atmosferik Buhar Kürü Uygulanan Cihaza Ait Resim

#### 2.2.4. Agregalara Uygulanan Pozolanik Aktivite Testi (TS 25)

Deney TS 25 ve TS EN 196-1'e göre gerçekleştirildi. Deneyde pozolanik özelliği araştırılan agregalar 0,5-1mm olacak şekilde çeneli kırıcıda kırıldı. Sonra sabit kütleye gelene kadar ort. 100 derece kurutuldu. Daha sonra 90 mikron elek üstünde toplam kütlenin en fazla %8'i olana kadar bilyeli değirmende öğütüldü. TS 25'te belirtilen oranlarda hazırlanan en az %95 saflıkta sönmüş kireç, standart kum ve pozolan karıştırıcıda homojen oluncaya kadar karıştırıldı. Normal kıvam oluncaya kadar karışım suyu eklendi ve su miktarı kaydedildi. 4×4×16cm ebatlarındaki 3 kalıba 2'şer aşamada döküldü ve 24 saat oda sıcaklığında (23°C ± 2) bekletildi. Daha sonra kalıplarından çıkarılmadan 6 gün 55°C (±2)'de etüvde kurutuldu. Devamında ilk olarak eğilme dayanımı deneyi sonra da kırılan parçalara basınç dayanım testi gerçekleştirildi. Pozolanik aktivite için minimum basınç dayanımı 4 MPa olmalıdır. Deneye ait resim Şekil 35'te verilmiştir.



Şekil 35: Pozolanik Aktivite Deneyi ve Çimento Pastalarına Uygulanan Deney Cihazları

#### 2.2.5. Lignin Hazırlanması

Ligninin hazırlanma aşamaları aşağıda açıklanmıştır:

1kg siyah lignin likörü alındı. 1,5 litre su içine 8 ml sülfürik asit ( $H_2SO_4$ ) çözeltisi hazırlanarak (pH:5) lignin likörü üzerine yavaş bir şekilde eklendi. Ekleme işlemi tamamlandıktan sonra bir süre beklendi. Devamında çöken lignin içeren süspansiyon 63 µm çaptaki elekten süzüldü ve 70-80°C'de 24 saat kurutuldu. Kurutulan katı lignin ortalama 63 µm elekten geçecek şekilde öğütüldükten sonra naylon poşet içinde kullanım gününe kadar saklandı. Şekil 36'da katı ligninin elde edilme aşamaları gösterilmektedir (Erdem vd., 2016).



**Şekil 36:** Katı Ligninin Elde Edilişi

Akışkanlaştırıcı ve hava sürükleyici katkı maddesi olarak, belli oranlarda kullanılan lignin, karışım suyunu yarisında tamamen çözülerek (pH 8-9 olacak şekilde) karışıma eklendi.

#### 2.2.6. RBM'lerin Hazırlanması

Akışkanlaştırıcı katkı maddesi olarak RBM'ler, çimento ağırlığının %0,04'ü oranında karışım suyunun yarisında tamamen çözülerek (pH 8,5-9,5 olacak şekilde) karışıma eklenerek kullanıldı. Karışım suyunun kalan diğer yarısı, istenilen çökme elde edilinceye kadar eklendi.

#### 2.2.7. Numunelere Uygulanan Mikro Yapı Analizleri

Agregaları temsil edecek şekilde toz halinde alınan numunelerin XRD analizi ve SEM görüntüleme işlemleri Bayburt Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarında ( BUMER) gerçekleştirildi. DTA/TG/DTG analizleri Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarında azot gazı kullanılarak 150 ml/dak. akışlı azot gazı atmosferinde ve 10°C/dak ısıtma hızında yapıldı. Tez kapsamında agregalara ve beton numunelere gerçekleştirilen XRD, SEM görüntüleme ve DTA/DTG analizlerinin yapıldığı cihazlara ait bilgiler Tablo 20'de verilmiştir.

**Tablo 20:** Mikro Yapı Analizlerin Gerçekleştirildiği Cihazlara Ait Bilgiler

| Analiz Adı        | Cihaz Markası | Cihaz Modeli      |
|-------------------|---------------|-------------------|
| XRD               | Bruker        | D8 Discover XRD   |
| SEM               | Fei           | Nova nano SEM 450 |
| DTA/DTG           | Hitachi       | Exstar 7300       |
| SEM (Bingöl Üni.) | Jeol          | Jsm-6510          |

#### 2.2.8. YBBT'lerin Mukavemetlerini Geliştirme Çalışmaları

YBBT agregası ile üretilen THB'lerden, 28 gün kür sonunda hedeflenen min. 30 MPa basınç dayanımı elde edilememiştir. YBBT'nin sulu ortamda çözünmesi ve mekanik

dayanımının yetersiz olması nedeni ile THB’de kırılma ilk olarak agregadan meydana gelmiştir. Bu nedenle agregaların mukavemetlerinin artırılması amaçlandı. BBT üzerine yapılan, laboratuvar deneylerinde ve taşın kullanım alanlarına bakıldığında, boşluk yapısına bağlı olarak su emme değerinin yüksek olduğu (%23) ve puzolanik aktivite özelliği olduğu belirlendi. YBBT bileşiminde bulunan demir, suda çözünebilir yeşil renkli demir bileşikler şeklinde suda çözünerek hidrasyon sırasında aderansı düşürdüğü ve agrega öz dayanımını azalttığı dikkate alınarak iyileştirme çalışmaları gerçekleştirildi. Bu amaçla, YBBT agregaları kirece doymuş suda (KDS) pH değeri 12-13 aralığında sabit olacak şekilde 30 gün süreyle bekletilerek çözünen kısımların agregadan uzaklaşması ve puzolanik reaksiyonların gerçekleşmesi sağlandı.

Agregalar 30 gün sodaya doymuş suda (SDS) bekletilerek, yüzeylerinde karbonatlaşma oluşması ve hafif bazik ortamda puzolanik reaksiyonların gerçekleşmesi sağlandı. Böylece agregaların hem sertleşmeleri hem de çimento pastası ile daha iyi aderans yapmaları hedeflendi. BBT agregaları suda çözündükleri için THB’nin ilk dayanımlarını düşürmekte ve betonun priz süresini uzatmaktadır. Bu problemi çözebilmek için, agregalar beton dökümünden önce 30 gün pH 8-9 olarak sabitlenen suda bekletildi ve sonrasında yıkanarak kurutuldu. Bu sayede agregalardan suda çözünebilir yeşil renkli demir bileşikler uzaklaşmış olacak ve çimento hidrasyonu üzerine olumsuz etkileri ortadan kaldırılmış olacaktır.

## ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

### 3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde, gerçekleştirilen deneylerden elde edilen sonuçların kapsamlı değerlendirilmesi yapılmıştır. Tez çalışması altı ana başlıkta gerçekleştirildi.

1. Deneylerde kullanılan Bayburt tüf çeşitlerinin THB ve TOHB üretiminde kullanılabilirliği araştırıldı.
2. HB üretiminde akışkanlaştırıcı/hava sürükleyici olarak kullanılan atık katı ligninin, hafif betonun çimento hidrasyonuna etkisi araştırıldı.
3. HB üretiminde akışkanlaştırıcı katkı maddesi olarak kullanılan atık RBM'lerin çimento hidrasyonuna etkisi araştırıldı.
4. Bayburt tüfünün öz mukavemetinin geliştirilmesine yönelik çalışmalar yapıldı.
5. İnce öğütülmüş Bayburt taşı filler malzemesi, değişik oranlarda çimento yerine ikame edilmek suretiyle maliyetin düşürülmesine yönelik çalışmalar yapıldı.
6. Atıkların mevcut rezervleri araştırılarak, üretilen THB ve TOHB'lerin piyasada kullanılan betonlarla maliyet yönünden karşılaştırılması gerçekleştirildi.

#### 3.1. BAYBURT TAŞININ (TÜF) THB VE TOHB ÜRETİMİNDE KULLANIMI

Yöre halkı arasında Bayburt taşı adı ile bilinen tüfler, Bayburt yöresinden; sarı, beyaz ve yeşil benekli olarak çıkmaktadır. Bu tez çalışmasında atık olarak elde edilen; BST, BBT ve YBBT agregalarının taşıyıcı ve taşıyıcı olmayan hafif beton üretiminde kullanılabilirliği araştırıldı.

##### **Agregaların Puzolanik Aktivitelerinin Belirlenmesi**

Tez çalışmasında kullanılan BBT, YBBT ve BST agregalarının; puzolanik aktivite değerinin belirlenmesi için TS'25'e uygun olarak puzolanik aktivite deneyleri yapıldı. Tablo 21'de, kullanılan BT'lere ait puzolanik aktivite test sonuçları verilmiştir.

**Tablo 21:** BT'lerin Puzolanik Aktivite Test Sonuçları (TS 25)

| Agrega Çeşidi | Puzolanik Akt. Dayanım, (MPa) | Kuru Kütle Day., (MPa) |
|---------------|-------------------------------|------------------------|
| BBT           | 4,2                           | 40,5                   |
| YBBT          | 6,2                           | 71                     |
| BST           | 2,8                           | 23,8                   |

Tablo 21’den görüldüğü gibi, puzolanik aktivite deneyinde BBT ve YBBT agregalarının, TS 25’te istenen en az 4 MPa dayanım değerini aştığı ancak BST agregasının bu değerin altında kaldığı dolayısıyla puzolan olarak değerlendirilemeyeceği ancak BBT ve YBBT agregalarının puzolanik etkisinin olduğu belirlendi.

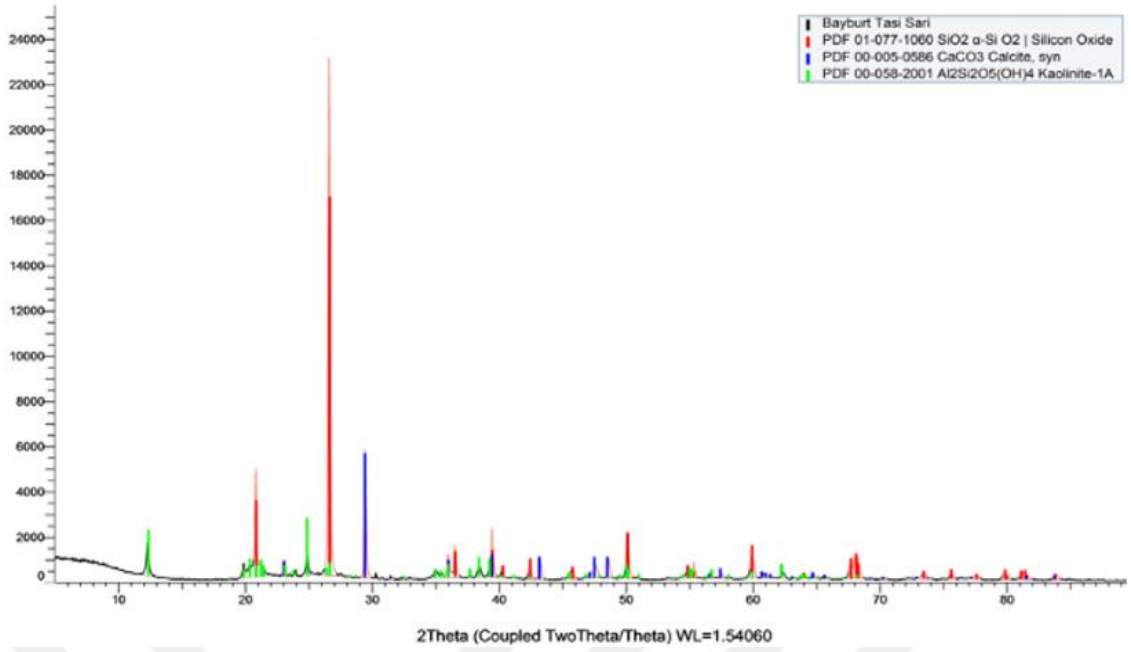
### 3.1.1. BST’nin Minerolojik Analizi ve THB Üretiminde Kullanımı

BST agregasının THB üretiminde kullanılabilirliğinin araştırılması amacı ile agrega deneyleri gerçekleştirildi. Tablo 22’de BST, pomza ve perlit agregalarının fiziksel özellikleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

**Tablo 22:** BST, Pomza ve Perlit Agregalarına Ait Deney Sonuçları

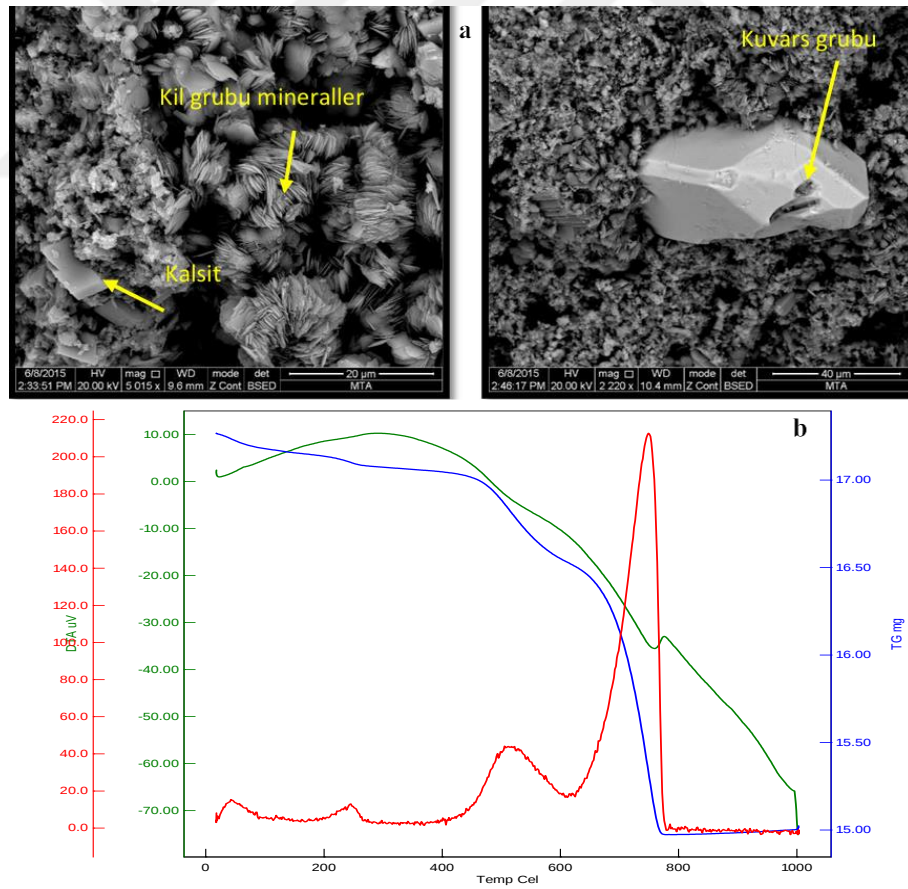
| Elekt Çapı., (mm)          | BST    |      |      | Pomza  |      |      | Perlit |      |      |
|----------------------------|--------|------|------|--------|------|------|--------|------|------|
|                            | 11,2-4 | 4-2  | 2-0  | 11,2-4 | 4-2  | 2-0  | 11,2-4 | 4-2  | 2-0  |
| DBHA, (g/cm <sup>3</sup> ) | 2,23   | 2,27 | 2,38 | 1,62   | 1,96 | 2,51 | 1,94   | 2,06 | 2,19 |
| KBHA, (g/cm <sup>3</sup> ) | 2      | 2,08 | 2,25 | 1,35   | 1,77 | 2,46 | 1,85   | 1,99 | 2,18 |
| GBHA, (g/cm <sup>3</sup> ) |        | 1,17 |      |        | 0,93 |      |        | 1,25 |      |
| Su Emme, (%)               | 11,7   | 9,2  | 5,8  | 19,9   | 10,7 | 1,7  | 4,6    | 3,63 | 0,6  |
| Filler, (0-0,063)          |        | 2,78 |      |        | 3,08 |      |        | 2,9  |      |

Tablo 22’den görüldüğü gibi, BST agregasının su emme değerleri diğer agregalara oranla daha düşük olmakla birlikte BHA değerleri diğer agregalardan hafifçe yüksektir. BST, hafif agrega olarak değerlendirilebilmesi için gerekli 2 g/cm<sup>3</sup> sınırını aşmaktadır. Gerçekleştirilen puzolanik aktivite deneylerinden elde edilen sonuçlara göre (Tablo 21) BST agregası puzolan sayılabilmek adına yeterli puzolanik aktivite göstermemiştir. BST’nin XRD difraktogramı Şekil 37’de, SEM mikrofotografı ve DTA analizleri Şekil 38’de verilmektedir.



**Şekil 37:** BST Agregası XRD Difraktogramı

XRD difraktogramında ana yapılar olarak silis, alümina (kaolinit) ve kalsit yapıları izlenmektedir.



**Şekil 38:** BST'nin SEM Görüntüsü (a) (Şahin, 2018) , (b) DTA, TG ve DTG Analizi

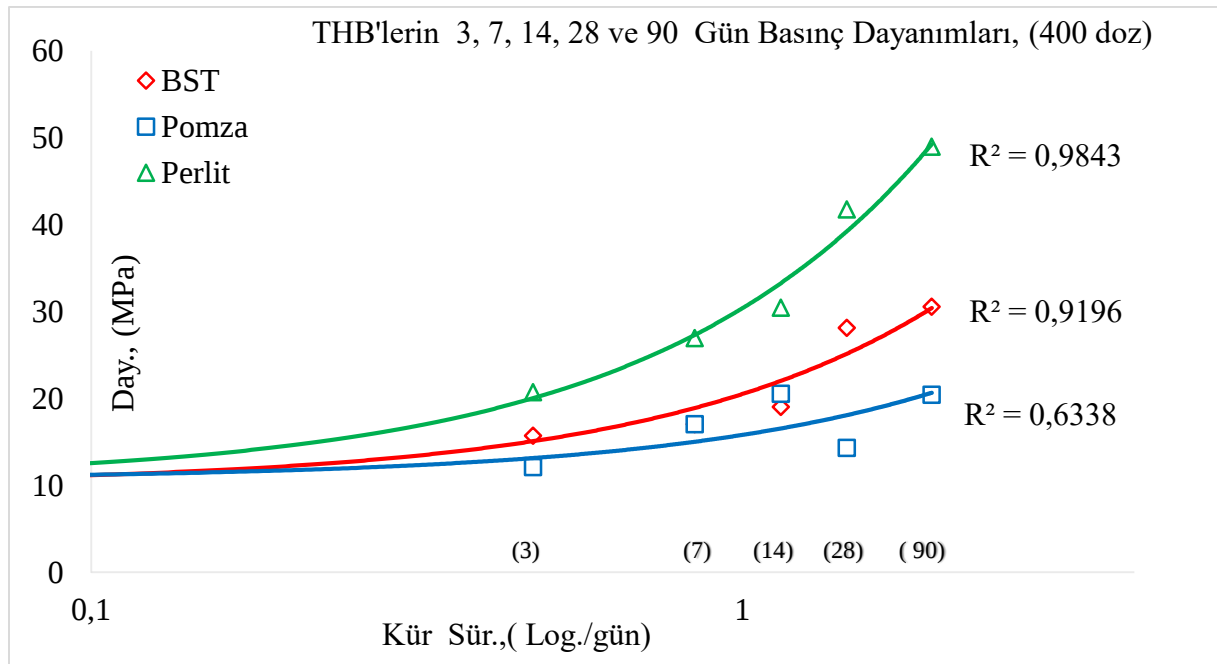
BST'nin SEM mikrograflarında kalsit, kaolinit ve kuvars yapıları görülmektedir.

TG, DTG ve DTA termogramlarında 700°C civarındaki endotermik pikler kalsitin bozunarak sönmemiş kirece dönüşmesine, 200 ve 500°C civarındaki endotermik pikler kaolinitin kristal sularının uzaklaşmasına, 100°C civarındaki endotermik pikler ise numunedeki kaba nemin uzaklaşmasına ait piklerdir.

BST'nin diğer bir olumsuz yanı kuru BHA değerinin 2g/cm<sup>3</sup> değerini hafif aşması bu yüzden ilgili standarta göre HB agregası olarak kullanılamayacak olmasıdır. Bir başka dezavantaj BST'nin öz dayanımının düşük oluşu ve agregadan kırılmak suretiyle beton dayanımını düşürmesidir. Puzolanik aktivite özelliğinin zayıf olması, öz dayanımının yetersizliği ve ocaklarının sınırlı olması BST'nin HB üretiminde kullanımını sınırlandırmaktadır. BST agregası ile piyasada HB üretiminde kullanılan perlit ve pomza agregalarının da kullanıldığı bir seri ile THB deneyi gerçekleştirildi. TS 802'ye uygun oluşturulan granülometri eğrisi kullanılarak, 400 kg/m<sup>3</sup> çimento dozajı ve 0,55 su/çimento oranında hazırlanan karışımdan elde edilen sonuçlar aynı çimento dozajındaki perlit ve pomza agregalarıyla karşılaştırmalı olarak Tablo 23'te ve Şekil 39'da verilmiştir.

**Tablo 23:** BST, Perlit ve Pomza ile Üretilen THB'lerin Basınç Dayanımı (400 Doz)

| Kür Sür., (G) | Basınç Dayanımı, (MPa) |       |        |
|---------------|------------------------|-------|--------|
|               | BST                    | Pomza | Perlit |
| 1             | 11,2                   | 9,7   | 10,8   |
| 3             | 15,8                   | 12,2  | 20,8   |
| 7             | 17,1                   | 17,1  | 27     |
| 14            | 19,1                   | 20,6  | 30,5   |
| 28            | 28,2                   | 14,4  | 41,8   |
| 90            | 30,6                   | 20,5  | 49     |



**Şekil 39:** BST, Pomza ve Perlit Agregaları ile THB Üretimi

Şekil 39'dan görüldüğü gibi BST agregası ile üretilen THB'lerin basınç dayanım değerleri, pomza agregası ile üretilen THB'lerden oldukça yüksek, perlit agregaları ile üretilen THB'lerden ise daha düşüktür. Bu sonuçlara göre BST agregası HB yerine normal beton agregası olarak başarıyla kullanılabilir. Bu çalışmanın hedefi hafif beton üretimi olduğundan, yukarıda belirtilen dezavantajları da dikkate alınarak BST ile hafif beton deneylerine devam edilmedi.

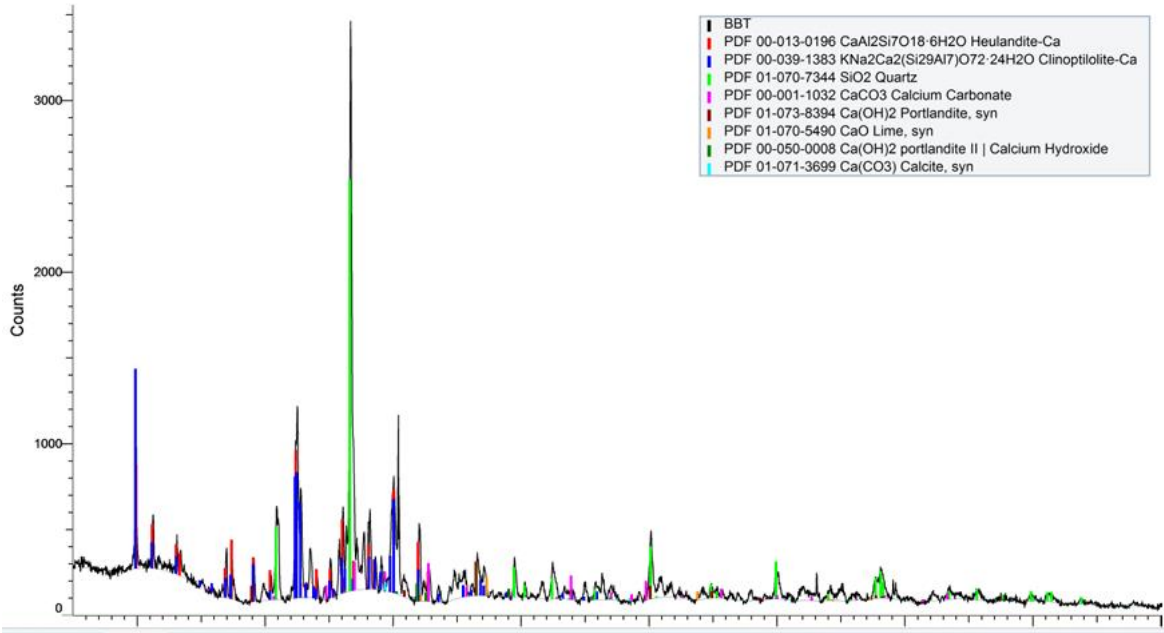
### 3.1.2. BBT'nin Minerolojik Analizi ve THB Üretiminde Kullanımı

Beyaz renkli Bayburt Taşı, ocaklardan yeşil Bayburt benekli beyaz taş (YBBT) ve Bayburt beneksiz beyaz taş (BBT) olarak iki farklı tür olarak çıkarılmaktadır. Tablo 21'de görüldüğü gibi BBT ve YBBT'nin puzolanik aktiviteleri yeterli olduğundan ve puzolan sayılabileceklerinden bu taşlarla betonların ileri yaş dayanımlarının daha fazla olabileceği öngörüldü. Tablo 24'te BBT'ye ait agrega deney sonuçları verilmiştir.

**Tablo 24:** BBT, Perlit ve Pomza Agregası Deneyleri

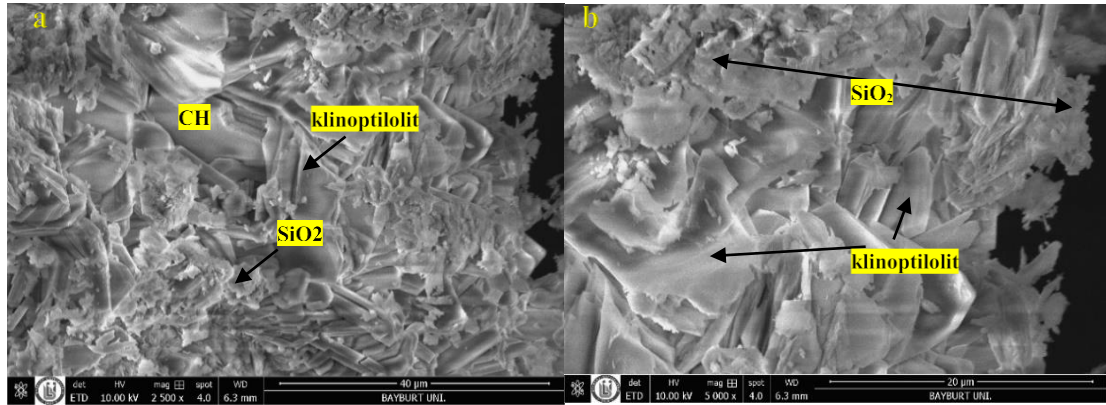
|                            | BBT    |      |      | Pomza  |      |      | Perlit |      |      |
|----------------------------|--------|------|------|--------|------|------|--------|------|------|
| Elek Sınıfı, (mm)          | 11,2-4 | 4-2  | 2-0  | 11,2-4 | 4-2  | 2-0  | 11,2-4 | 4-2  | 2-0  |
| DBHA, (g/cm <sup>3</sup> ) | 1,97   | 2,01 | 2,1  | 1,62   | 1,96 | 2,51 | 1,94   | 2,06 | 2,19 |
| KBHA, (g/cm <sup>3</sup> ) | 1,71   | 1,76 | 1,9  | 1,35   | 1,77 | 2,46 | 1,85   | 1,99 | 2,18 |
| GBHA, (g/cm <sup>3</sup> ) |        | 1,07 |      |        | 0,97 |      |        | 1,25 |      |
| Su Emme, ( %)              | 15,1   | 14,3 | 10,4 | 19,9   | 10,7 | 1,7  | 4,6    | 3,63 | 0,6  |
| Filler, (0-0,063)          |        | 2,55 |      |        | 3,08 |      |        | 2,9  |      |

Tablo 24'ten görüldüğü gibi gerçekleştirilen agregası deneylerinde BBT agregasının kuru BHA değerinin 2 g/cm<sup>3</sup> değerinden daha düşük ve pomzaya yakın değerlerde olması, BBT agregasının perlit ve pomzaya alternatif bir hafif beton malzemesi olabileceğini göstermektedir. Şekil 40'ta BBT agregasına ait XRD difraktogramı, Şekil 41'de SEM mikrografları verilmektedir.



**Şekil 40:** BBT Agregasının XRD Difraktogramı

Şekil 40'ta, BBT agregasında hâkim yapıların kuars, zeolit (klinoptilolit), heulandit ve sanidin olduğu görülmektedir. Özellikle sodyum-potasyum-kalsiyum alüminatlardan oluşan feldspat yapıları ve demir oksit SEM görüntülerinde de belirgin bir şekilde izlenmektedir. Ayrıca portlandit  $[Ca(OH)_2]$  ve kirecin de varlığı görülmektedir. Zeolitik yapıların puzzolanik özelliği olduğu bilindiğinden uzun dönemde bu agregata ile üretilen HB'lerin BST'ye oranla daha iyi dayanım vermesi beklenmektedir.



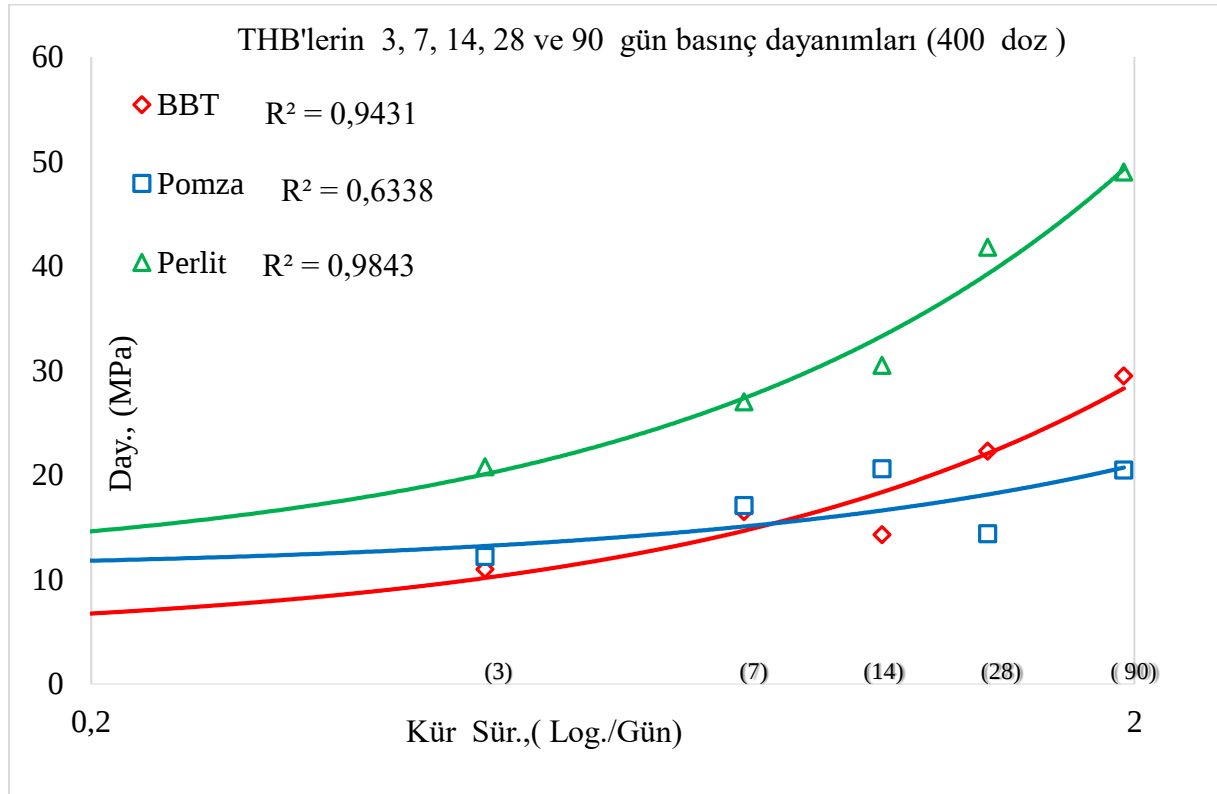
**Şekil 41:** BBT Agregasına Ait SEM Mikrografları

Şekil 41'de BBT agregasına ait SEM mikrografları verilmektedir. Agregada zeolit ve silis içeriğinin fazla olmasının yanında kalsiyum hidroksit yapılarının da izlenmesi; özellikle yörede “BBT zamanla sertleşmektedir” sözünü daha iyi açıklamaktadır. Bileşimdeki sönmüş kireç zamanla taşın suyla teması ve/veya hava nemiyle etkileşerek çözünmesi ve puzzolanik reaksiyonlarla zeoliti C-S-H jellerine dönüştürmesi şeklinde açıklanabilir. Ayrıca sönmüş kireç

havadaki karbon dioksitle karbonata dönüşerek sertleşmeye katkıda bulunmaktadır. Tablo 25 ve Şekil 42’de BBT agregası kullanılarak 400 kg/m<sup>3</sup> dozajla üretilen THB dayanım değerleri pomza ve perlit agregalarıyla karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

**Tablo 25:** BBT, Perlit ve Pomza ile Üretilen THB’lerin Basınç Dayanımı (400 Doz)

| Kür Sür., (G) | Basınç Dayanımı, (MPa) |       |        |
|---------------|------------------------|-------|--------|
|               | BBT                    | Pomza | Perlit |
| 1             | 4,2                    | 9,7   | 10,8   |
| 3             | 11                     | 12,2  | 20,8   |
| 7             | 16,5                   | 17,1  | 27     |
| 14            | 14,3                   | 20,6  | 30,5   |
| 28            | 22,3                   | 14,4  | 41,8   |
| 90            | 29,5                   | 20,5  | 49     |

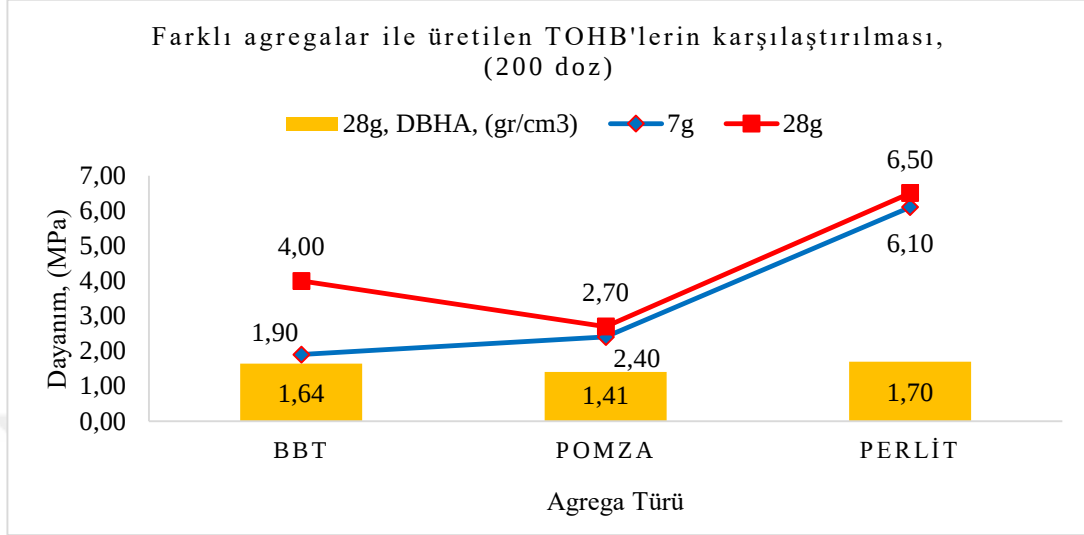


**Şekil 42:** BBT ile Üretilen THB’lerin 7, 28 ve 90 Gün Basınç Dayanımları

Görüldüğü gibi 400 kg/m<sup>3</sup> çimento dozajı ve BBT agregası kullanılarak üretilen THB’ler hedeflenen 28 günlük en az 30 MPa basınç dayanım hedefine ulaşamamış ancak 90. gün basınç dayanım (29,5 MPa) değerine ulaşılabilmiştir. BBT ile elde edilen dayanım değerleri pomzadan oldukça yüksek, perlitten daha düşüktür. THB tasarımının değiştirilmesi (450 kg/m<sup>3</sup> dozaj, katkı ve 0,50 su/çimento) ile hedeflenen en az 30 MPa basınç dayanım değerine ulaşılabilir.

### BBT'nin TOHB'de kullanımı

TOHB üretiminde, YBBT agregasına göre daha hafif olması ve puzolanik aktivite özelliği nedeniyle BBT agregası kullanıldı. Şekil 43'te halen TOHB üretiminde piyasada kullanılan agregalar ile BBT içeren TOHB'ler karşılaştırılmalı olarak verilmektedir.



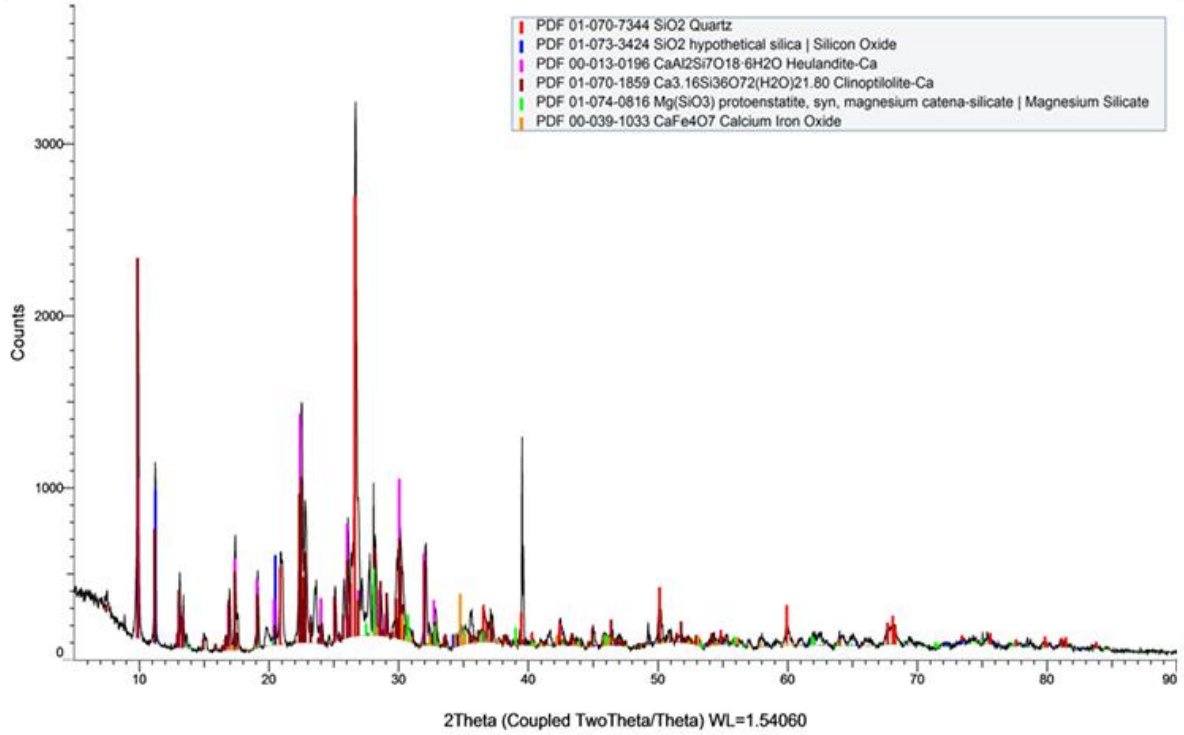
**Şekil 43:** TOHB Üretiminde Farklı Agregaların Karşılaştırılması

Şekil 43'te görüldüğü gibi, perlit ile üretilen TOHB'nin BHA değeri (1,70 g/cm<sup>3</sup>) en yüksektir. Perlitin silisli kristal yapısına bağlı olarak 28 günlük basınç dayanımı pomza ve BBT ile üretilen TOHB'den daha yüksektir (6,5 MPa). BBT'nin ileri yaşlarda puzolanik aktivitesinin gelişmesi, daha yüksek basınç ile sıkıştırılması ve havada kür uygulama yöntemi ile en az 5 MPa basınç dayanımlarına ulaşılabilceği düşünüldü. BBT ile üretilen TOHB'lerin doymuş BHA değerlerinin 1,64 g/cm<sup>3</sup> olması, hedeflenen 1,4-1,60 g/cm<sup>3</sup> arasındaki kuru BHA değerlerinde oluşabileceğini göstermektedir (TS EN- 206). Pomza agregası ile üretilen TOHB'ler beklendiği gibi en düşük BHA ve basınç dayanım (2,7 MPa) değerlerine sahiptir. Piyasada üretilen dolu gövdeli briketlerin basınç dayanımları 2-5 MPa arasında değişmektedir. ASTM'de yapısal olmayan briketler için 4,14MPa dayanım sınıfı belirlenmektedir. Sonuç olarak, bu standart esas alındığında BBT agregalarının TOHB üretiminde alternatif agrega olabileceği görülmektedir.

#### 3.1.3. YBBT'nin Minerolojik Analizi ve THB Üretiminde Kullanımı

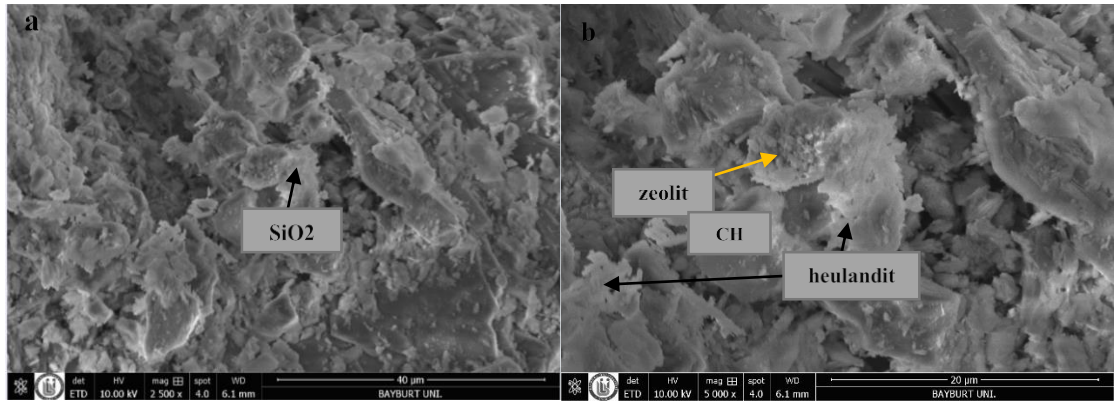
YBBT agregasının puzolanik aktivitesinin ve öz dayanımının daha yüksek olması nedeniyle THB üretiminde kullanılabilirliği araştırıldı. Şekil 44'te YBBT agregasına ait XRD difraktogramı verilmiştir.

(Coupled TwoTheta/Theta)



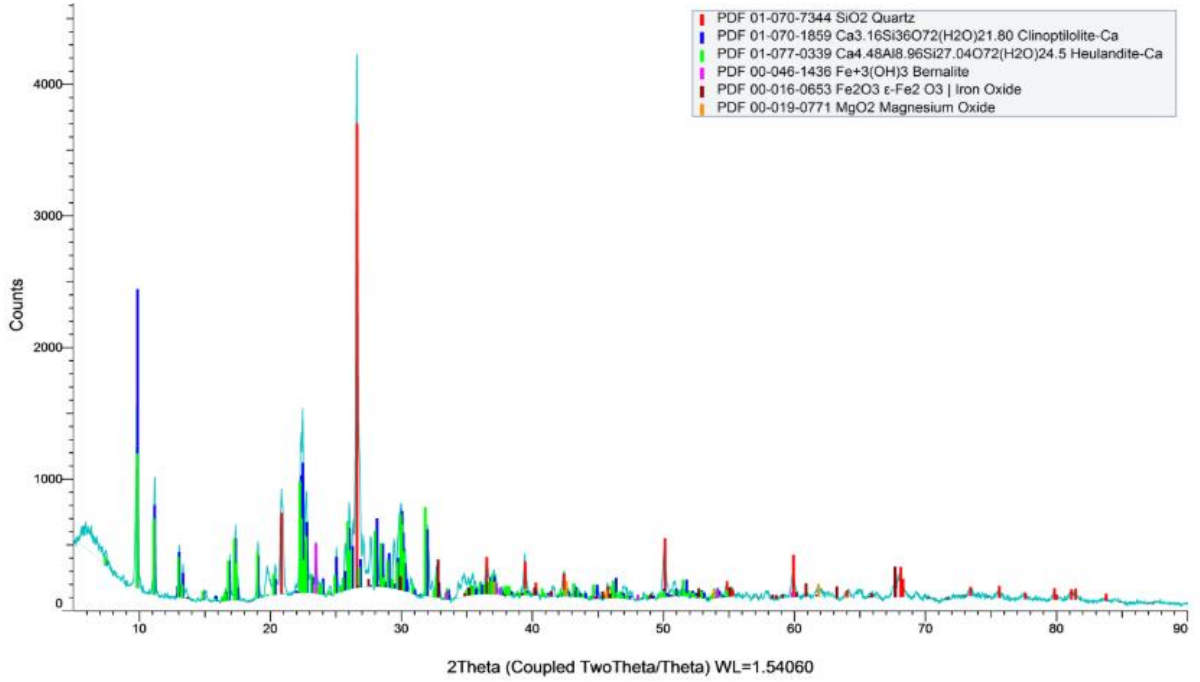
**Şekil 44:** YBBT Agregasına Ait XRD Difraktogramı

Şekil 44'teki YBBT agregasına ait XRD difraktogramından görüldüğü gibi YBBT agregasının silisyum ve zeolit (klinoptilolit ve heulandite) magnezyum silikat ve demir oksit ihtiva ettiği gözlenmektedir. Agregadaki amorf silis içeriğinin daha yüksek olması bu agregayla üretilen HB'lerin ileriki yaş dayanımlarının puzolanik aktivite nedeniyle daha yüksek olacağını işaret etmektedir. Şekil 45'te YBBT agregasına ait SEM mikrografıları görülmektedir.



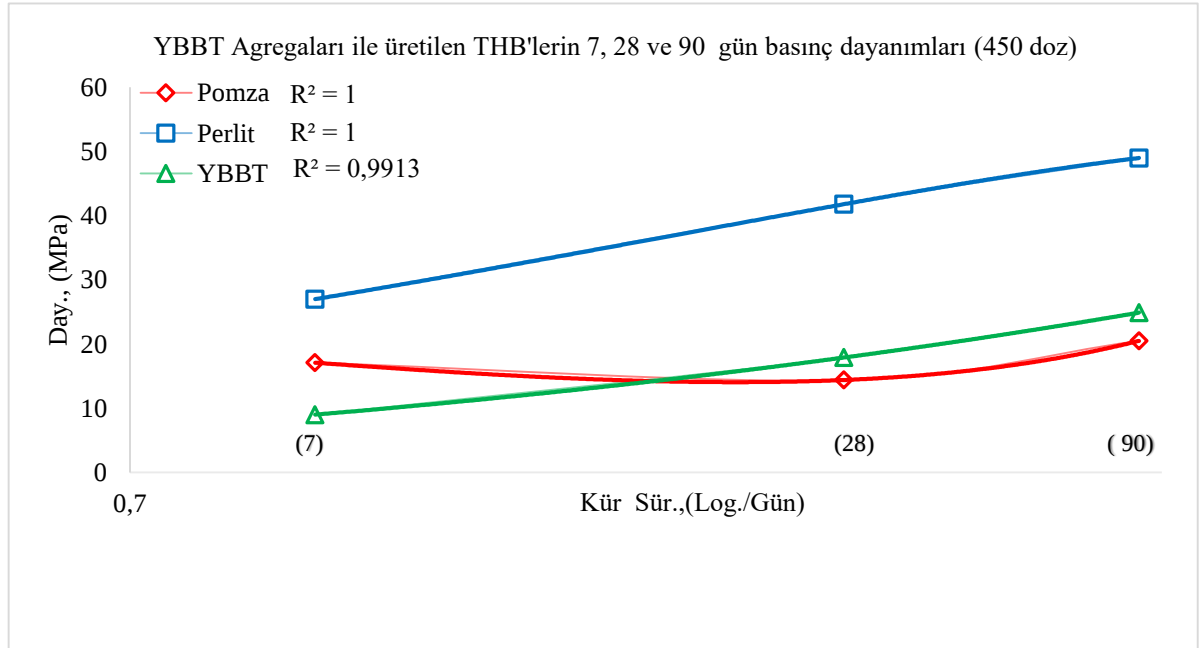
**Şekil 45:** YBBT Agregasının SEM Mikrografisi

SEM mikrografılarında, zeolit, heulandit gibi silis içerikli fazların fazla olduğu izlenmektedir. YBBT yapısında bulunan demiroksit; bu agreganın suda çözündüğünde yeşil renkli demir bileşiklerinin ayrılmasını açıklamaktadır. YBBT agregaları suda bekletilerek demirli bileşiklerin suda çözünerek uzaklaştırılması gerçekleştirildi. Şekil 46'da YBBT agregasının suda çözündükten sonra oluşan yeşil renkli jele ait XRD difraktogramı verilmiştir.



**Şekil 46:** YBBT Agregasından Çıkan Jele Ait XRD Difraktogramı

Difraktogram incelendiğinde, YBBT agregası suda bekletildikten sonra oluşan süzüntüde demirli ve magnezyumlu bileşiklerin varlığı bu bileşiklerin suda çözündüğünü ve hidrasyon üzerine olumsuz etki ederek dayanımların fazla yükselmediğini göstermektedir. Bu durumun sonucu olarak agregalara beton döküm işleminden önce iyileştirme çalışmaları yapıldı. Şekil 47’de YBBT, pomza ve perlit agregaları ile üretilen THB’lerden elde edilen sonuçlar verilmiştir.



**Şekil 47:** YBBT, Pomza ve Perlit Agregaları ile Üretilen THB’lerin Karşılaştırılması

Puzolanik özelliğe sahip YBBT agregaları ile üretilen THB'lerin ileriki yaş (90 gün) dayanımlarında diğer agregalar türlerinden daha fazla dayanım artışı beklenmektedir. Şekil 47'de 90. günde pomza agregası ile üretilen THB'lerin puzolanik aktiviteden dolayı dayanım artışı %20, perlit agregasının %14 ve YBBT agregasının dayanım artışı %38 olarak gerçekleşmiştir. YBBT agregalarına uygulanacak mukavemet iyileştirme çalışmaları ve bu agregalar ile üretilen THB'lere ait elde edilen sonuçlar ileride detaylı olarak açıklanmıştır.

### 3.2. KATI LİGNİNİN THB VE TOHB ÜRETİMİNDE KULLANIMI

Bu bölümde; katı ligninin THB ve TOHB üretiminde akışkanlaştırıcı/hava sürükleyici katkı olarak kullanımı ile ilgili çalışmalar verilmektedir.

#### 3.2.1. Katı Ligninin Optimum Kullanım Oranının Belirlenmesi

Katı ligninin optimum kullanım oranının belirlenmesi için ilk olarak Marsh Hunisi Akış Süresi deneyi (ASTM D 6910) ve yayılma miktarı deneyleri yapıldı (ASTM C1437 'Flow of hydraulic cement mortar'). Gerçekleştirilen deneylerde ligninin akışkanlaştırıcı özelliği piyasadaki diğer akışkanlaştırıcılarla karşılaştırıldı. Yayılma ve marsh hunisi deneyine ait bilgiler Tablo 26'da verilmiştir.

**Tablo 26:** Akışkanlaştırıcılara Uygulanan Marsh Hunisi Deneyi Değerleri

| Yayılma Miktarı Deneyi, (mm)            |        |      |      |      |      |      |      |
|-----------------------------------------|--------|------|------|------|------|------|------|
| Katkı, (%)                              | 0(Ref) | 0,20 | 0,40 | 0,60 | 0,80 | 1,00 | 1,20 |
| İksapl.900                              | 100    | 270  | 330  | 380  | 360  | 360  | 360  |
| İksapl.29                               | 100    | 220  | 240  | 195  | 310  | 280  | 300  |
| Lignin                                  | 100    | 180  | 195  | 220  | 220  | 220  | 220  |
| Marsh Hunisi Akış Hızı Deneyi, (Saniye) |        |      |      |      |      |      |      |
| Lignin                                  | 100    | -    | 23   | 33   | 45   | 41   | 40   |

Tablo 26'dan görüldüğü gibi piyasada kullanılan normal ve süper akışkanlaştırıcılarla ligninin karşılaştırılması amacı ile hazırlanan pastalarla Marsh hunisi akış hızı deneyi ve yayılma deneyleri yapıldı. Çimento pasta karışım sularına katı madde olarak ağırlıkça çimento miktarının % 0,2- 1,2'si oranında lignin ve diğer akışkanlaştırıcılar eklenerek pastaların yayılma miktarı mm olarak ölçüldü ve aritmetik ortalamaları alındı. Sim, 2007'de yaptığı çalışmada, katı lignini çimentoya %0,5 ila %2,0 oranlarında ekledi ve ürettiği numuneleri 3, 7, 14 ve 28 gün kürledi. Damıtılmış sudan sızan Ca, Na ve K iyonlarının

konsantrasyonunun, lignin ilavesize göre azaldığını ve numunelerin basınç dayanımlarının önemli ölçüde iyileştiğini buldu.

Lignin, çimento ağırlığının %0,6'sı oranında eklendiğinde en yüksek yayılma değerine ulaşıldı ve bu değere ulaşıldıktan sonra bu değer üstünde katkı miktarının artışına paralel akışkanlıkta herhangi bir değişiklik izlenmedi (220 mm). Ligninin molekül büyüklüğünün fazla olması ve çeşitli fonksiyonel gruplar içermesi sonuçların diğer katkılara göre farklı çıkmasına neden olmuştur. Lignin ile gerçekleştirilen Marsh Hunisi akış hızı deneyinde lignin, katkı oranı %0,8 değerinde en hızlı akış meydana gelmekte ancak %0,6 katkı oranından sonraki değerler priz süresinin standartların dışına çıkmasına neden olmaktadır. Tablo 27, 28 ve Şekil 48'de ligninin THB üretiminde optimum kullanım oranının belirlenebilmesi için gerçekleştirilen beton deney sonuçları verilmiştir.

**Tablo 27:** Çimentonun Fiziksel Özelliklerine Ligninin Etkisi

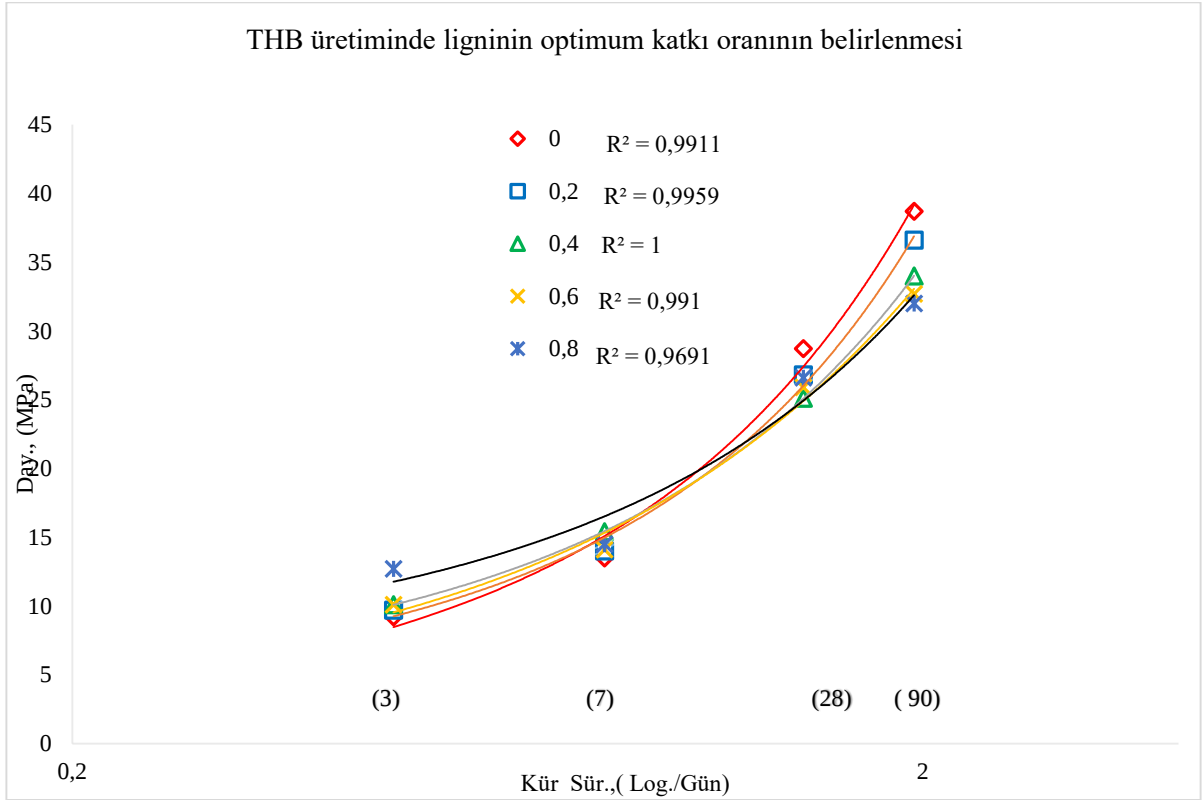
| Taze beton deneyleri    |                      |       |       |       |       |       |
|-------------------------|----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Lignin Or.,             | (%)                  | Ref.  | 0,2   | 0,4   | 0,6   | 0,8   |
| Ligninli Kar. Suyu pH'ı |                      | 7,28  | 7,38  | 7,38  | 7,37  | 7,20  |
| Priz Baş.,              | (Dk.)                | 260   | 330   | 350   | 350   | 330   |
| Priz Sonu,              | (Dk.)                | 520   | 540   | 570   | 585   | 615   |
| Çökme,                  | (cm)                 | 5,2   | 7     | 5,7   | 6,4   | 5,3   |
| SBHA,                   | (g/cm <sup>3</sup> ) | 2,064 | 2,038 | 1,989 | 1,958 | 1,989 |
| Su Kesme                | (%)                  | 0     | 4,5   | 5,4   | 8,8   | 10,1  |
| S/Ç                     |                      | 0,5   | 0,47  | 0,47  | 0,45  | 0,44  |

Tablo 27'den görüldüğü gibi lignin, THB karışımlarına çimento ağırlığının %0,2 - 0,8'i oranlarında eklendi. Ligninin optimum katkı oranının belirlenmesinde, priz sonu süresinin 10 saati geçmemesi ve su kesme ile en fazla yayılma değerleri dikkate alındı. Sonuç olarak ligninin optimum kullanım oranı çimento ağırlığının %0,6'sı olarak belirlendi.

**Tablo 28:** THB Üretiminde Ligninin Optimum Katkı Oranının Belirlenmesi (BBT)

| Sertleşmiş Betonların Basınç Dayanımları, (MPa) |         |       |       |       |       |
|-------------------------------------------------|---------|-------|-------|-------|-------|
| Kür Süresi, (G)                                 | Kontrol | %0,2L | %0,4L | %0,6L | %0,8L |
| 3                                               | 9,1     | 9,7   | 10,1  | 10,1  | 12,7  |
| 7                                               | 13,5    | 14,0  | 15,4  | 14,1  | 14,5  |
| 28                                              | 28,7    | 26,8  | 25,1  | 25,9  | 26,6  |
| 90                                              | 38,7    | 36,6  | 34,0  | 32,7  | 32    |
| 150                                             | 38,7    | 37,7  | 40,0  | 37,3  | 42,1  |

|                                |       |       |       |       |       |
|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 28g DBHA, (g/cm <sup>3</sup> ) | 1,878 | 1,849 | 1,853 | 1,805 | 1,840 |
|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|



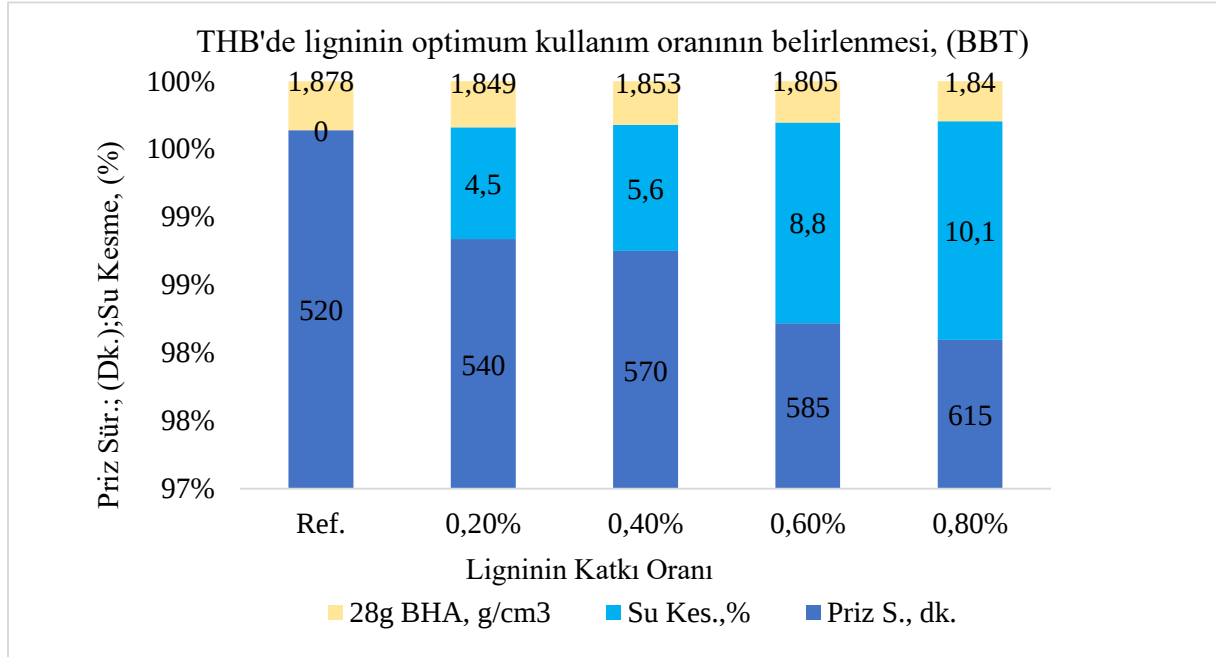
**Şekil 48:** Ligninin THB Üretimlerinde Optimum Katkı Oranının Belirlenmesi

Tablo 28 ve Şekil 48’de görüldüğü gibi lignin katkı miktarındaki artışa paralel olarak ligninin su kesme değerleri arttığı fakat 28 günlük basınç dayanımlarının kontrol karışımına oranla çok fazla değişmediği belirlendi. Burada dayanım değerlerinin kontrol karışımına göre belirgin artmaması sürüklenen hava miktarıyla ilgilidir. %0,6 lignin katkılı THB serisinin BHA değeri diğer karışımlara oranla daha düşük olması betonun önemli miktarda hava sürüklediğini göstermektedir.

### 3.2.1.1. Ligninin hava sürüklenme özelliği ile basınç dayanımları arasındaki ilişki

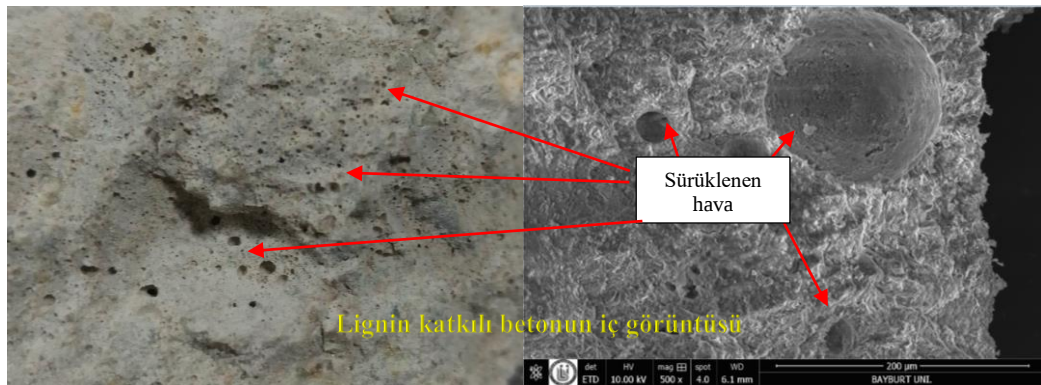
Ligninin hava sürüklenme miktarının tayininde sıkışık BHA (SBHA) deneyleri ve bu deneylerden elde edilen değerler referans alındı. Şekil 49’da görüldüğü gibi, ligninin katkı miktarındaki artışa bağlı olarak THB serilerinin BHA değerleri genel olarak azalmaktadır. Bu durum ligninin iki özelliği ile açıklanabilir. Lignin, karışım suyunda köpürdüğü için betonda hava sürükleyici etki oluşturmakta ve betonun BHA değeri düşmektedir. Diğer yandan akışkanlaştırıcı özelliğiyle betonun yerleştirilmesi aşamasında daha sıkışık bir beton elde edilmesine, s/ç oranını düşürerek daha yüksek dayanım vermesini sağlamaktadır. Başka bir

ifadeyle ligninin hava sürükleyerek daha boşluklu hafif beton oluşturma etkisiyle akışkanlaştırıcı ve dayanım artırıcı etkisi yarışmaktadır.



**Şekil 49:** Ligninin Katkılı THB’lerin Fiziksel Özellikleri

Genel olarak BHA değerinin azaldığı halde dayanımlarda hafif düşüş izlenmektedir. Bu durum ligninin hava sürüklemeye özelliğinin yanında akışkanlaştırıcı etkisinin de etkin olduğunu kanıtlamaktadır. Şekil 49’da %0,6 lignin katkılı karışımın hava sürüklemeye nedeni ile oluşan BHA değeri, kontrol betonuna göre % 5,1 azalmasına rağmen basınç dayanımındaki azalma % 6,2 olmuştur. Dayanımlarda oluşan bu düşüş oranı literatürde belirtilen oranın (%20) çok altındadır. Sonuç olarak, ligninin hava sürükleyerek dayanımlarda düşüşe neden olması, ligninin akışkanlaştırıcı etkisi ile ortadan kaldırılmıştır. Şekil 50 a ve b’de lignin katkılı 28 günlük THB’ye ait resim ve SEM görüntüsü verilmektedir. Literatürde betonun içerisine sürüklenen her %1 havanın, betonun basınç dayanımını %2-6 arasında azalmasına neden olduğu bilinmektedir (Kosmatka vd., 2002).

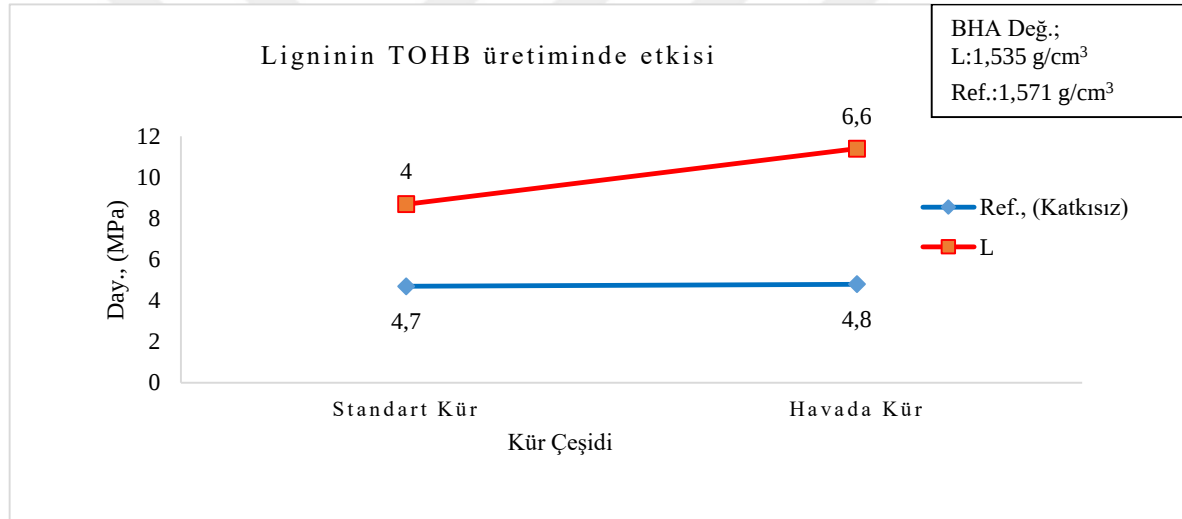


**Şekil 50:** Ligninin THB’lerde Sürüklediği Hava

Lignin katkılı sertleşmiş THB’lerin SEM görüntülerinde ve resimlerde ligninin THB karışımlarında oluşturduğu hava boşlukları görülmektedir. Oluşan hava kabarcıkları HB’nin donma çözülme etkisini azaltacağı gibi betonların maruz kalacağı yüksek ısılarda dayanıklılık ve izolasyon görevi de yapacaktır. Ayrıca sürüklenen hava kabarcıkları, betonun içindeki donan suya genleşme ortamı oluşturarak betonun çatlamasını da önlenmiş olacaktır.

### 3.2.2. Ligninin TOHB Üretiminde Kullanımı

Lignin TOHB serilerine çimento ağırlığının %0,6’sı katı madde olarak eklendi. Piyasada fabrikalarda üretilen BİMS briketler nemli hava kürü uygulanarak kırılmakta ve su kürü uygulanmamaktadır. Ayrıca Fabrikalarda hazırlanan beton karışımları üzerine titreşimli basınç uygulanmakta ve s/ç oranı daha da azaltılarak çimento dozajı düşürülmektedir. Şekil 51’de lignin eklenerek üretilen TOHB’lere standart ve hava kürü uygulanması ile elde edilen sonuçlar verilmiştir.



**Şekil 51:** Ligninin TOHB Basınç Dayanımına Etkisi

Şekil 51’den görüldüğü gibi, 28 gün suda kürlenme sonunda %0,6 lignin katkılı TOHB’un basınç dayanımı %17,5 artış ile 4 MPa’dan 4,7 MPa’a yükselmiştir. %0,6 lignin katkısı ile %5,8 su kesme değeri gerçekleşmiştir. Bu durum, ligninin akışkanlaştırıcı/su azaltıcı etkisi ile hava sürüklenme etkisinin gerçekleştiği tezini desteklemektedir. Su küründen elde edilen basınç dayanım değeri (4,7 MPa) hedeflenen 28 günlük en az 5 MPa basınç dayanım değerine yakındır. Bu çalışmada; standartlara uygun şekilde işlemler yapıldığından, dayanımların yüksekliğinden ziyade eklenen ligninin çimento hidrasyonuna etkilerinin nasıl olduğunun izlenmesi amaçlanmış olup şartlar değiştirilmemiştir. Numuneler suda kür edildiği ve agreganın su emme değerlerinin yüksek olduğu ve çok yaşken dayanımları ölçüldüğü için dayanımlar düşük çıkmıştır. Hava kürü ile üretilen lignin katkılı TOHB karışımlarında,

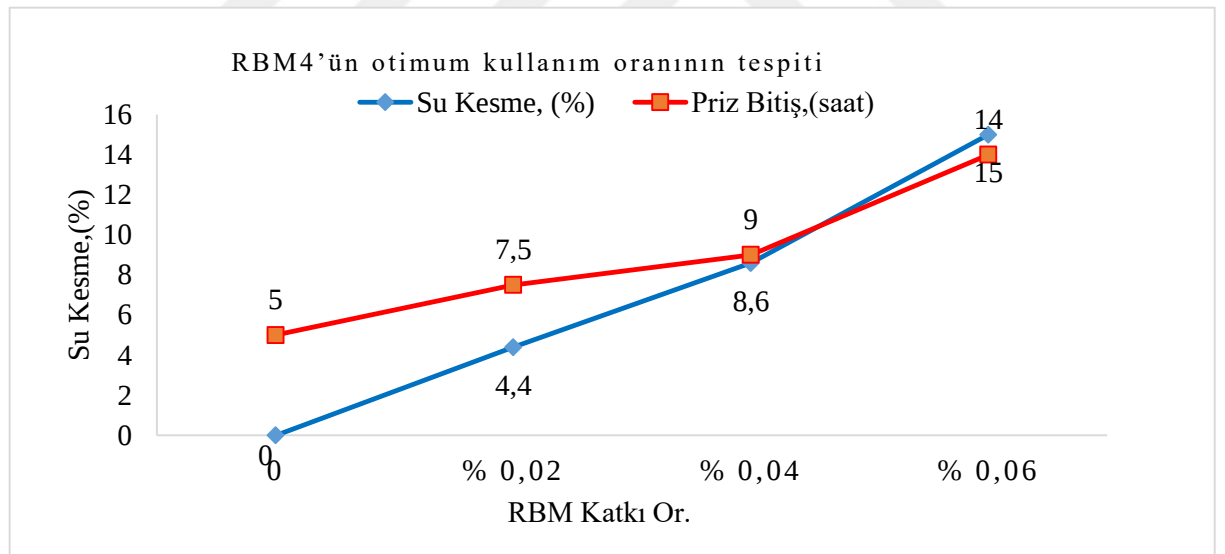
hedeflenen en az 5 MPa basınç dayanım değerine ve 1,4-1,6 g/cm<sup>3</sup> aralığındaki kuru BHA değerine ulaşılmıştır (TS EN 771-3, TS 3234). Fabrikalarda kullanılan presleme basıncı ve s/ç oranının daha da düşürülmesiyle çok daha yüksek dayanım değerleri elde edilebilecek ve buna bağlı olarak çimento dozajı daha da düşürülebilecektir.

### 3.3. RBM'LERİN THB VE TOHB ÜRETİMİNDE KULLANIMI

Tez çalışmasında dört farklı atık RBM, akışkanlaştırıcı/su azaltıcı katkı maddesi olarak kullanılarak taşıyıcı ve taşıyıcı olmayan hafif betonlar üretildi. RBM'lerin karışımlardaki etkisi basınç dayanımı ve su kesme oranı değerleri bakımından değerlendirildi.

#### 3.3.1. RBM4'ün Optimum Kullanım Oranının Belirlenmesi

Literatürde RBM'lerin akışkanlaştırıcı beton katkı maddesi olarak kullanımına yönelik çalışma olmamasından dolayı optimum kullanım oranlarının belirlenmesi için RBM4 katkısı kullanılarak pasta deneyleri gerçekleştirildi. Atık RBM4 karışımlara çimento ağırlığının %0, 0,02, 0,04, 0,06'sı oranlarında eklendi. Priz süresinin on saati aşmaması ve kontrol karışımının su kesme değerleri referans olarak alındı. Optimum kullanım oranının belirlenebilmesi için gerçekleştirilen pasta deneylerine ait sonuçlar Şekil 52'de verilmektedir.

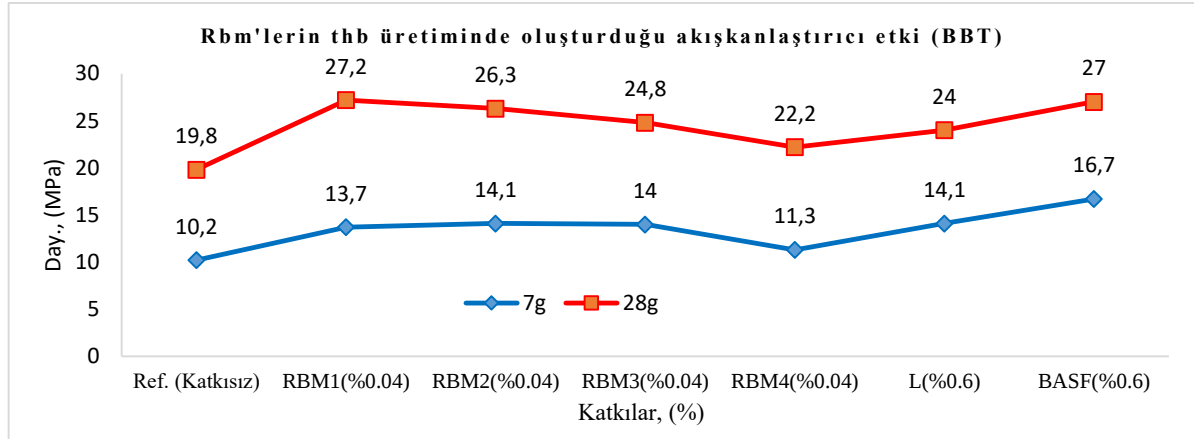


**Şekil 52:** RBM4'ün Otimum Kullanım Oranının Tespiti

Şekil 52'den görüldüğü gibi HB karışımlarına %0,04 RBM4 eklenmesi ile su kesme değeri %8,6 ve priz sonu süresi 9 saat olarak gerçekleşmiştir. %0,06 RBM4 kullanımı ile %15 su kesme değeri elde edilmesine rağmen priz süresi standart on saati aştığı (14 saat) için HB üretimlerinde %0,04 RBM4 optimum karışım oranı olarak belirlendi. Tekstil fabrikalarında boyama çözeltisi derişimindeki reaktif boyar madde miktarı yaklaşık %0,04 olduğu için bu oran kullanıldı.

### 3.3.2. RBM'lerin THB Üretiminde Akışkanlaştırıcı Katkı Maddesi Olarak Değerlendirilmesi

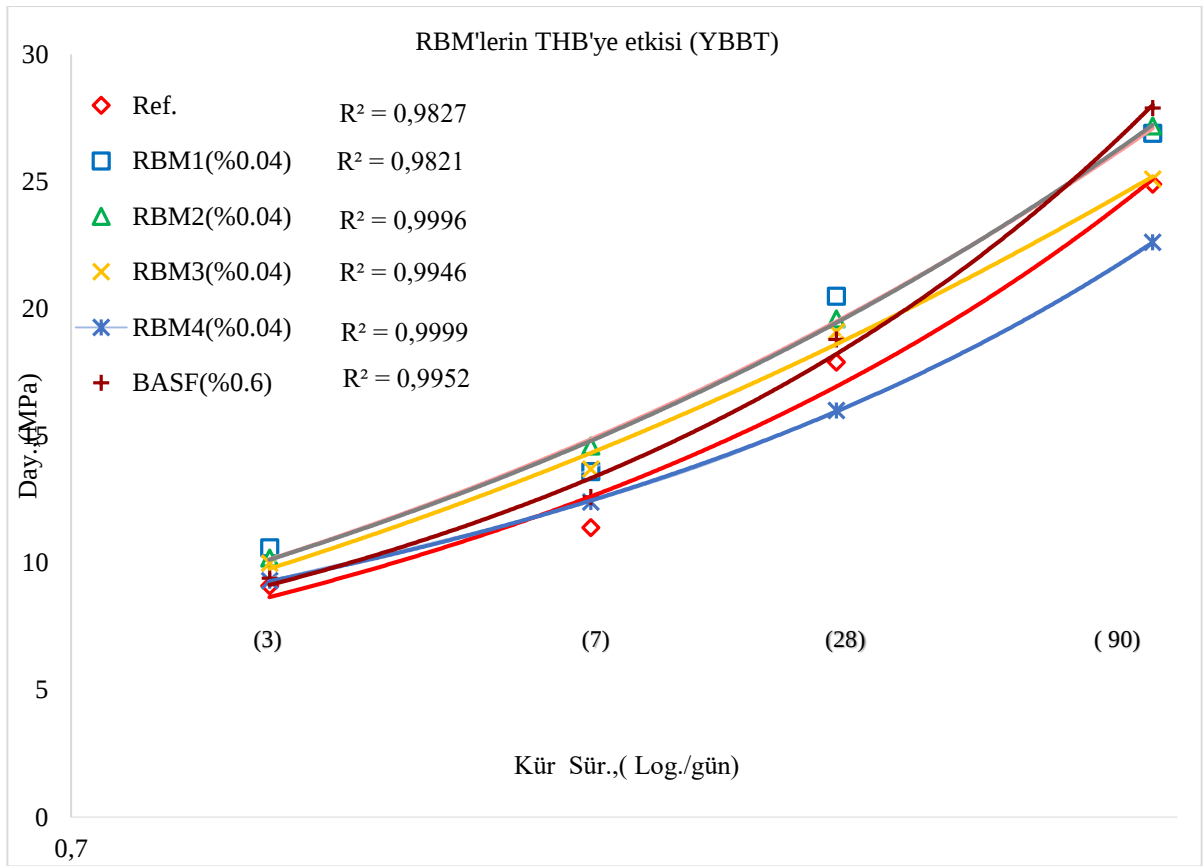
THB üretiminde %0,04 oranında akışkanlaştırıcı/su azaltıcı katkı maddesi olarak dört farklı RBM (RBM1, RBM2, RBM3, RBM4) ve iyileştirme yapılmayan BBT agregası kullanıldı. RBM'lerin üretilen HB'ler üzerindeki etkileri su kesme oranı, basınç dayanımındaki değişim ve BHA değerleri bakımından değerlendirildi. Şekil 53'te, BBT agregaları ve RBM'ler kullanılarak üretilen THB'lere ait sonuçlar toplu olarak verilmiştir.



**Şekil 53:** BBT Agregası ile Üretilen THB'lerin Mekanik Özellikleri

Şekil 53'te, kullanılan tüm katkıların akışkanlaştırıcı/su azaltıcı etki gösterdiği aynı zamanda su azaltmalarına bağlı olarak kontrol betonuna göre dayanım artışına neden oldukları görülmektedir. BBT agregaları ile üretilen THB'lerin hedeflenen 28 günlük 30 MPa dayanım değerine yaklaştığı görülmüştür. RBM4'ün dayanım değeri diğerlerine göre daha düşük olmakla birlikte kontrol karışımından daha yüksek çıkmıştır.

İşlem görmemiş YBBT agregaları ve RBM'ler kullanılarak üretilen THB'lere ait sonuçlar ise Şekil 54'te verilmiştir.



**Şekil 54:** YBBT Agregaları ile Üretilen THB'lere RBM'lerin Etkisi

YBBT agregası ile hazırlanmış THB'lerin basınç dayanımları, BBT agregası ile üretilmiş THB'lerin basınç dayanımlarına benzer şekilde kontrol karışımından daha yüksektir. RBM4 katkısı içeren THB'nin dayanımı BBT ile hazırlanan karışımlara benzer şekilde daha düşük çıkmakla birlikte kontrol karışımından daha yüksektir. YBBT agregaları ile hazırlanan THB'lerin 90 günlük dayanımlar da benzerlik göstermektedir. BBT ve YBBT agregaları ile üretilen THB'lere katkı olarak kullanılan RBM'ler, karşılaştırma amaçlı olarak kullanılan ticari lignosülfat katkısına yakın değerler vermiştir.

Genellikle kontrol karışımlarına kıyasla katkı içeren tüm karışımlarda basınç dayanımlarında artış gözlenmiştir. Şekil 53 ve 54'ten görüldüğü gibi, BBT agregası ile üretilen THB'lerin 28 günlük basınç dayanımında %12,2-37,4 arasında, YBBT agregaları ile üretilen THB'lerde ise %5-14,5 arasında değişen değerlerde artışlar gözlenmiştir. Özellikle puzolanik aktivite özelliğine sahip olan YBBT agregaları ile üretilen THB'ler, 90 gün sonunda hedeflenen 30MPa basınç dayanım değerine çok yaklaşmıştır.

RBM1 ve RBM2 katkısı içeren karışımların su kesme değerleri sırası ile %23 ve %22'dir. Buna bağlı olarak 28 günlük basınç dayanım değerleri kontrol betonuna göre sırası ile %9,5-14,5 artmıştır. THB üretiminde akışkanlaştırıcı olarak RBM3 ve RBM4 katkıları eklenerek üretilen THB'lerin 28 gün sonunda basınç dayanımları, kontrol betonuna göre sırası

ile % 5,0-6,1 artmıştır. Akışkanlaştırıcıların sınıflandırılmasında TS EN 934-2 referans alındığında ilgili standarda göre RBM1, RBM2 ve RBM3 katkıları su kesme değerleri açısından(%9-23) süper akışkanlaştırıcı (SA), RBM4 ise su kesme değerleri açısından (%9) normal akışkanlaştırıcı (NA) olarak değerlendirildi.

RBM2 boyar maddenin yapısı incelendiğinde nispeten esnek ve uzun zincir yapısı nedeniyle tanecikler arası etkileşimi azaltarak daha iyi bir kıvam sağladığı ve basınç dayanımını arttırdığı söylenebilir. RBM3 boyar maddesinin RBM2 ye benzer dayanım özellikleri göstermesi molekül büyüklüklerinin birbirine yakınlığı ve fonksiyonel gruplarının benzerliği ile açıklanabilir. RBM3 boyarmaddesi RBM2'ye göre daha düzlemsel bir yapıya sahip olduğundan agrega yüzeylerine tutunmada ve sarmada RBM2'ye göre daha sınırlı etki göstermiş ve buna bağlı olarak daha düşük su kesme ve daha düşük dayanım değerleri vermiştir. RBM4 katkılı betonun dayanım değeri diğer RBM'lere nispeten düşüktür. Bu durum, bu boyarmaddenin düşük molekül ağırlığına sahip olması, düzlemsel ve kısmen küresel yapısı nedeniyle diğer boya moleküllerine göre tanecikler arası etkileşimi yeterince düşürememesi ile açıklanabilir. Şekil 55'te, RBM katkılı THB'lerin 28 gün su kürü uygulandıktan sonra açık havada kurutulmuş resimleri görülmektedir. Burada RBM katkılı betonların 28 gün kür sonunda renklerini koruduğu görülmektedir. Buradan anlaşıldığı gibi RBM katkıları THB'ların renklendirilmesinde başarıyla kullanılabilir.



**Şekil 55:** RBM'ler ile Üretilen THB Numunelerinin Görüntüleri (a)RBM1, (b)RBM2, (c)RBM3, (d)RBM4, (e) Kontrol

RBM'lerin HB üretiminde su azaltıcı katkı maddesi olarak kullanımı aynı zamanda ek bir avantaj olarak betonu renklendirmektedir. Ayrıca bazik kür ortamında su içinde çok uzun süre beklediği halde boyaların çıkmaması, herhangi bir renk solması olmaması renkli beton üretiminde önemli bir avantajdır. RBM'lerin kür suyuna geçmemeleri bir başka deyişle boyaların betondan ayrılmamaları, genellikle sodyum tuzu halinde suda çözünebilen boyar

maddelerin, çimento ortamında bol miktarda bulunan kalsiyum iyonları ile çözünmeyen tuzlarına dönüşmesi ile açıklanabilir.

### 3.3.3. RBM'lerin TOHB Üretiminde Akışkanlaştırıcı Katkı Maddesi Olarak Değerlendirilmesi

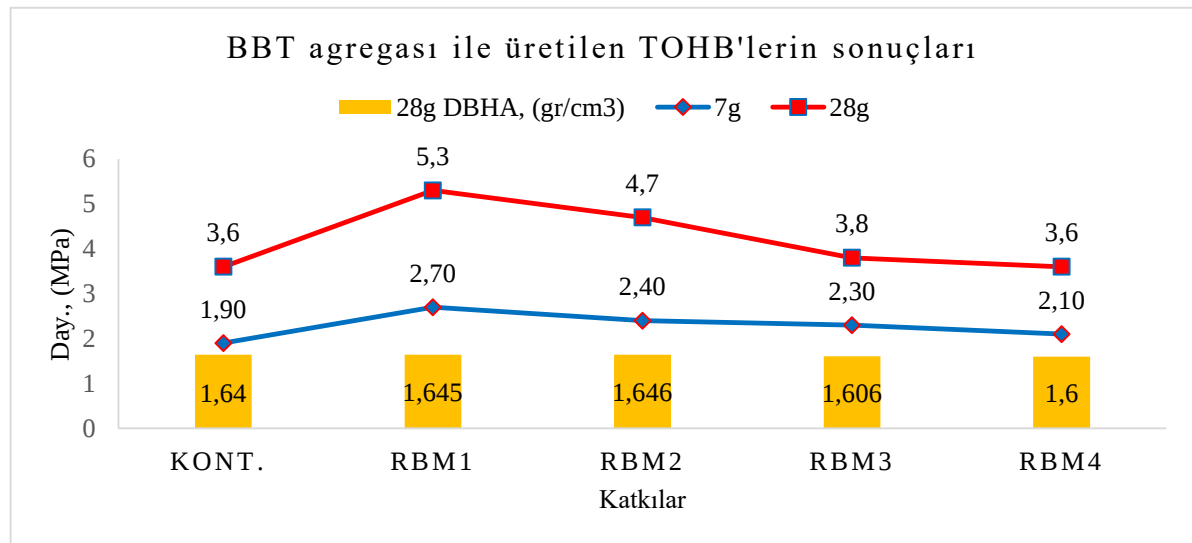
TS EN 206-1'e göre TOHB üretiminde D1,6 ( $1,4 < D < 1,6$ ) hafif beton sınıfı hedeflendi. Bu doğrultuda daha boşluklu ve hafif beton üretimi gerçekleştirebilmek için karışımlarda kullanılacak iri agrega oranı artırıldı. Tablo 29 ve Şekil 56,57'de RBM katkılı, suda ve havada kür yapılan TOHB'lerin deney sonuçları verilmiştir.

**Tablo 29:** BBT ve RBM'lerin TOHB üretiminde kullanımı

| TOHB'lere Su Kürü Uygulaması       |       |       |       |       |       |
|------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| TOHB/KAT                           | Ref., | RBM1  | RBM2  | RBM3  | RBM4  |
| Katkı Or., (%)                     | 0     | 0,04  | 0,04  | 0,04  | 0,04  |
| 7g, Day,, (MPa)                    | 1,9   | 2,7   | 2,4   | 2,3   | 2,1   |
| 28g, Day,, (MPa)                   | 3,6   | 5,3   | 4,7   | 3,8   | 3,6   |
| Sıkışık BHA, (gr/cm <sup>3</sup> ) | 1,54  | 1,555 | 1,540 | 1,565 | 1,515 |
| Tablo 29'un devamı                 |       |       |       |       |       |
| 28g, DBHA, (gr/cm <sup>3</sup> )   | 1,640 | 1,645 | 1,646 | 1,606 | 1,600 |

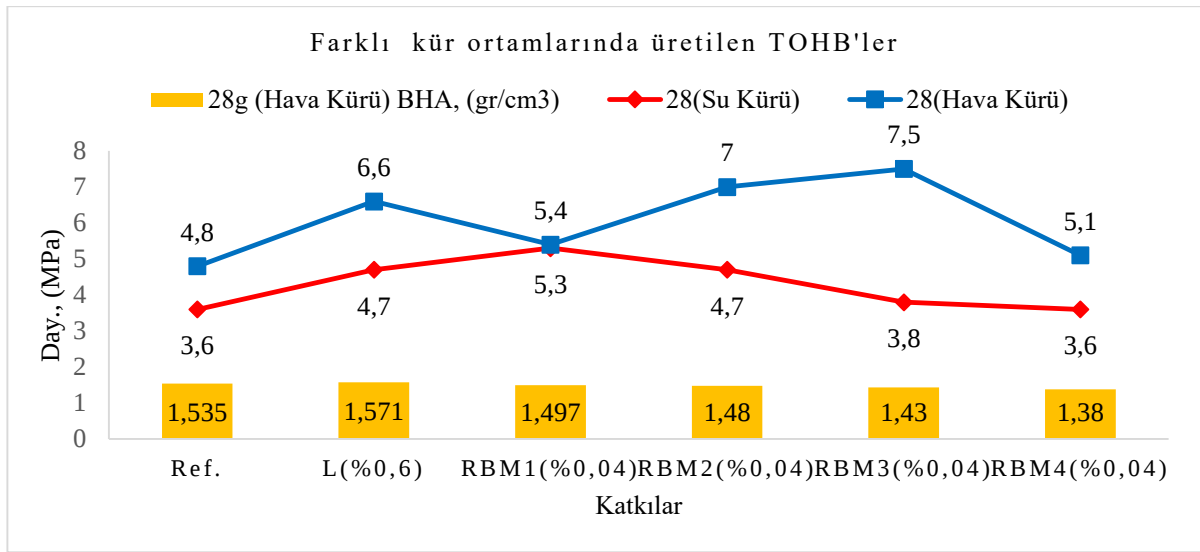
  

| TOHB'lere Hava Kürü Uygulaması   |       |       |       |       |       |
|----------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| TOHB/Katkı                       | Ref., | RBM1  | RBM2  | RBM3  | RBM4  |
| 28g, Day,,, (MPa)                | 4,8   | 5,4   | 7,0   | 7,5   | 5,1   |
| 28g, KBHA, (gr/cm <sup>3</sup> ) | 1,535 | 1,497 | 1,480 | 1,430 | 1,380 |



**Şekil 56:** Su Kürü Uygulanan TOHB'lerin Basınç Dayanımı-BHA İlişkisi

RBM katkıları kullanılarak üretilen TOHB serilerinin basınç dayanımları, genellikle kullanılan katkıların su azaltma miktarları ile orantılı bir şekilde artmıştır. Boşluk oranı yüksek olan TOHB'lere su kürü uygulandığı zaman suyun fazla nüfuzu sonucu, beton içerisindeki agregalar suda çözünmekte ve hamur-agrega ara yüzünde aderans zayıflamaktadır. Çözünmenin devam etmesi sonucu hidrasyon ürünlerinin oluşumu olumsuz etkilenmektedir. Suda kürlenmiş TOHB numunelerde hedeflenen en az 5 MPa dayanım değerine RBM1 ile RBM2 katkılı serilerde ulaşılmıştır. RBM3 ve RBM4 katkılı seriler 5 MPa dayanım değerine yakın değerlerdedir. Farklı bir uygulama olarak TOHB numunelerine hava kürü uygulaması yapıldı. TOHB numuneleri 28 gün %55-65 nemli hava içeren ortamda bekletildi. Bu şekilde kür edilmiş ve çeşitli katkıları içeren TOHB için elde edilen sonuçlar Şekil 55'te verilmiştir.

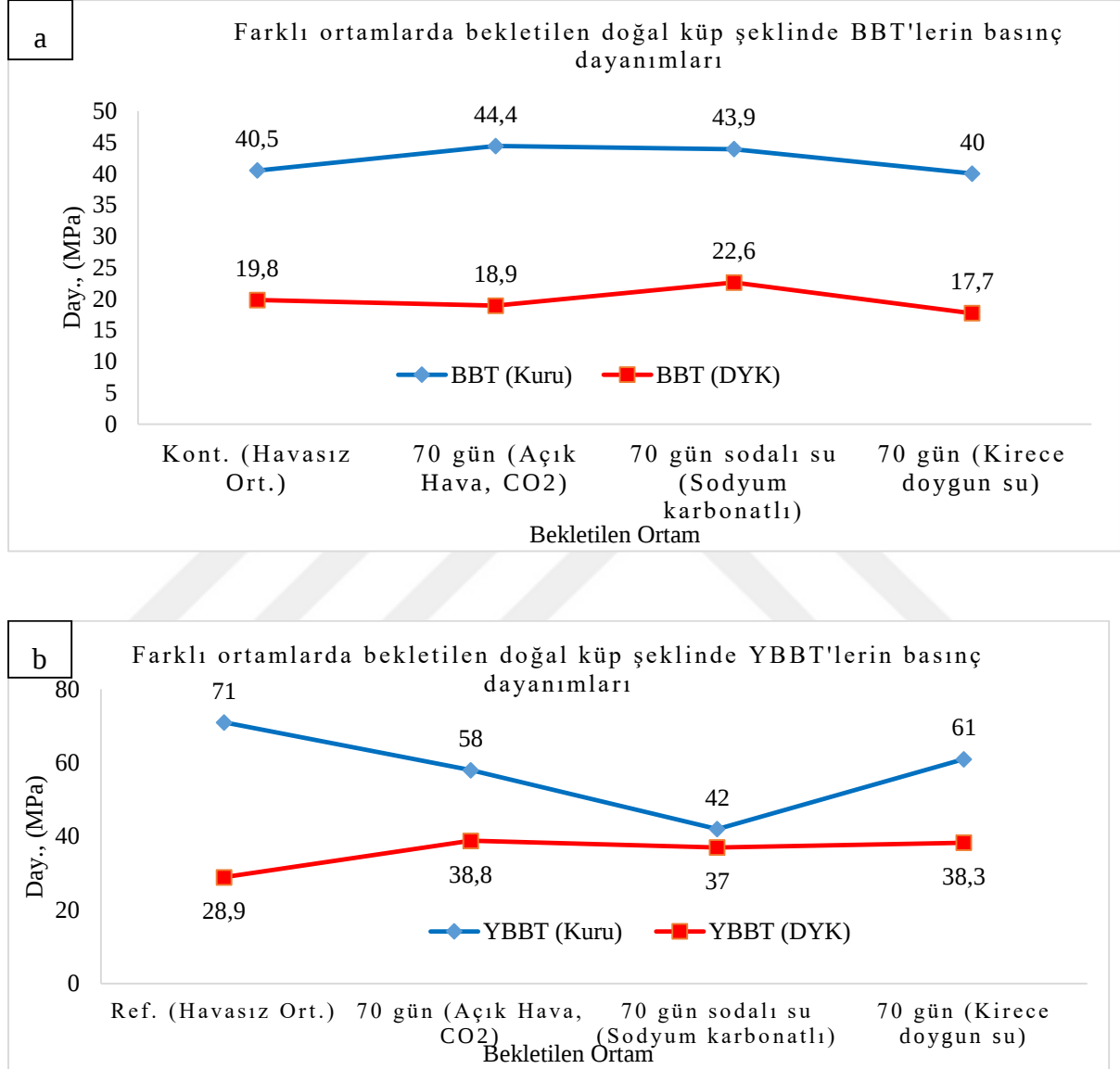


**Şekil 57:** Hava Kürü Uygulanan TOHB'lerin 28 Günlük Basınç Dayanımı-BHA İlişkisi

BİMS Fabrikalarında üretilen numuneler nemli hava ortamında bekletilerek kür yapılmakta ve su ile herhangi bir kürleme işlemi uygulanmamaktadır (İMO, 2015). Kuru haldeki numunelerin basınç dayanım değerleri Şekil 57'dan görüldüğü gibi hedeflenen en az 5 MPa basınç dayanım değerinin üzerindedir. Dolayısıyla bu katkıların herbiri süperakışkanlaştırıcı katkı olarak rahatlıkla kullanılabilir. Ayrıca üretilen dolu gövdeli TOHB'lerin sıkıştırma (press) işleminin laboratuvarın kısıtlı şartlarında gerçekleşmesi (0,1 MPa) ve fabrikalardaki gibi press uygulanamaması TOHB'lerin basınç dayanımlarının beklenenin altında kalmasına sebep olduğu, fazla basınç uygulanması durumunda çok daha yüksek dayanımlar elde edilebileceği ve hatta çimento dozajının biraz daha düşürülebileceği söylenebilir.

### 3.3.4. BBT ve YBBT Agregalarının Karşılaştırılması

Tez çalışmasında kullanılan BBT ve YBBT agregalarının kütle halinde öz dayanımlarını belirlemek ve geliştirmek için deneyler gerçekleştirildi. 6×6×6 cm ebatlarında kesilerek hazırlanan BBT ve YBBT'ler suda, kirece doymun sulu çözeltide ve sodalı suda içeren ortamlarda bekletilmek suretiyle mukavemetlerindeki değişim incelendi. Şekil 58'de 70 gün değişik ortamlarda bekletilerek hazırlanan BBT'lere ilişkin sonuçlar verilmiştir.

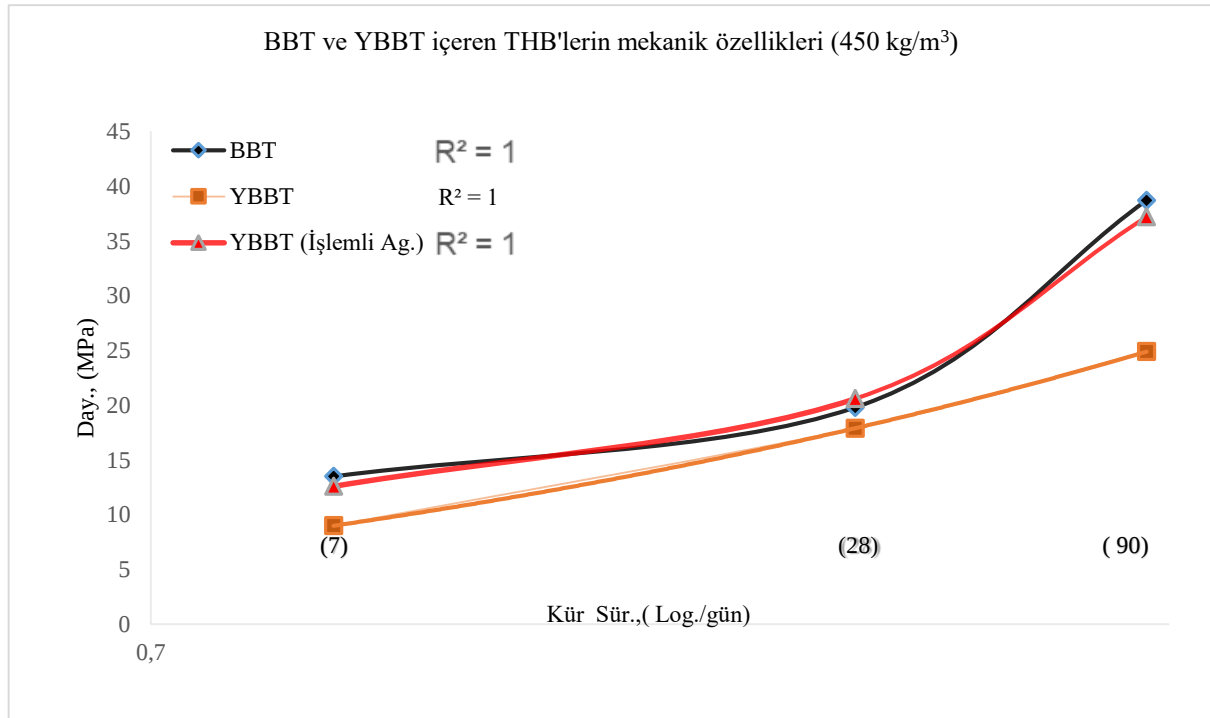


**Şekil 58:** Agregalarının Öz Mukavemetlerini Geliştirme Çalışmaları (a) BBT, (b) YBBT

BBT ve YBBT küp numuneleri; su, kirece doymun su, sodalı su ve havasız ortamlarda bekletildikten sonra basınç dayanımlarının belirlenmesi aşamasında suya doymun ve kuru olarak dayanım ölçümleri gerçekleştirildi. BBT ve YBBT agregalarının kuru ve doymun dayanımlarının belirlenmesindeki amaç THB üretiminde kullanılan agregaların su içerisindeki davranışının belirlenmesidir. Buradaki diğer bir beklenti ise puzolanik aktivite özelliğine sahip olan BBT ve YBBT agregalarının su ve/veya kirece doymun suda puzolanik reaksiyonlarının

tamamlanması ve daha sonra, havada karbonasyonla dayanımlarını artırmaktır. Değişik ortamlarda bekletilen BBT taşlarında %11, YBBT taşlarında ise %45 öz dayanım artışı gerçekleşmiştir. Genel olarak YBBT'lerin dayanımları beneksiz BBT'lerden yaklaşık %50 daha fazla olması; YBBT'nin puzolanik aktivite özelliğinin daha fazla olmasından kaynaklanmaktadır. Taşların küp şeklinde olmaları iç kısımlarına suyun ve kirecin nüfuz etmesindeki zorluklar dikkate alındığında daha küçük boyutlardaki agregalarda bu işlemlerin daha da iyi sonuçlar vereceği aşikardır.

Şekil 59'da işlem görmemiş BBT ve YBBT agregaları ile üretilen THB'lerin mekanik özellikleri verilmektedir.



**Şekil 59:** BBT ve YBBT İçeren THB'lerin Mekanik Özellikleri

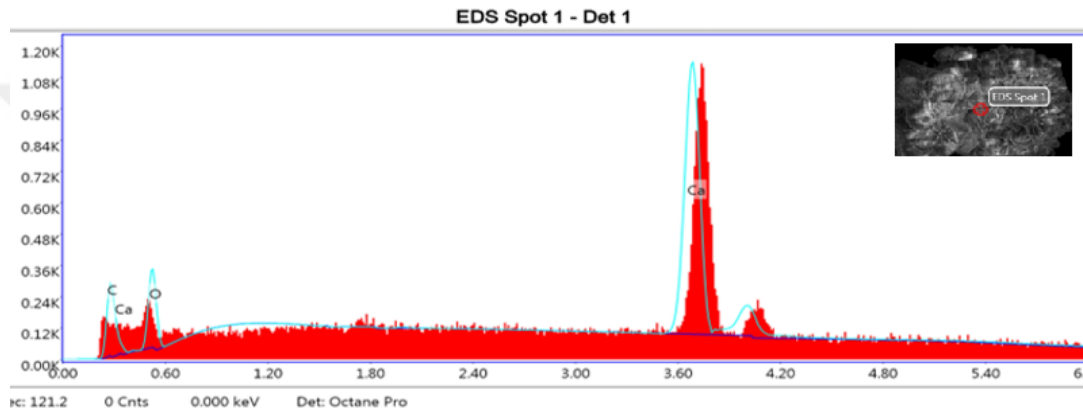
Şekil 59'dan görüldüğü gibi, BBT agregası ile üretilen THB basınç dayanımları tüm kür periyotlarında YBBT agregası ile üretilen THB serilerinden daha yüksektir. Bu durum, YBBT agregasının bileşiminde bulunan demir ve magnezyum bileşiklerinin çözünerek hidrasyonun olumsuz etkilenmesi ile açıklanabilir. Denemeler sırasında yeşil renkli demir bileşiklerinin çözünmesi çok belirgin olarak izlenmiştir. BBT agregasının da puzolanik aktiviteye sahip olmasından dolayı ileri yaş dayanımları artmıştır. YBBT agregalarının kütle dayanımlarının ve puzolanik aktivite özelliğinin daha yüksek olması dikkate alınarak THB üretimine bu agregaya devam edildi. Bu doğrultuda çalışmanın diğer bir aşaması olarak YBBT agregalarının mukavemetlerini geliştirme çalışmaları yapıldı.

### 3.4. YBBT'LERİN MUKAVEMETİNİ GELİŞTİRME ÇALIŞMALARI

Çalışma kapsamında YBBT agregaları ile üretilen THB'lerde, ilk kırılmanın agregadan meydana gelmesi ve agregaların su kürü sırasında çözünmesi ile hidrasyonun olumsuz etkilenmesinden dolayı hedeflenen 30 MPa basınç dayanım değerine az farkla ulaşılamadı. Bu olumsuz durumların ortadan kaldırılması amacı ile agregalar 30 gün kirece doymun suda, sodaya doymun suda ve şehir şebeke suyunda bekletildikten sonra üretilen THB'lerin basınç dayanımlarındaki değişiklik araştırıldı.

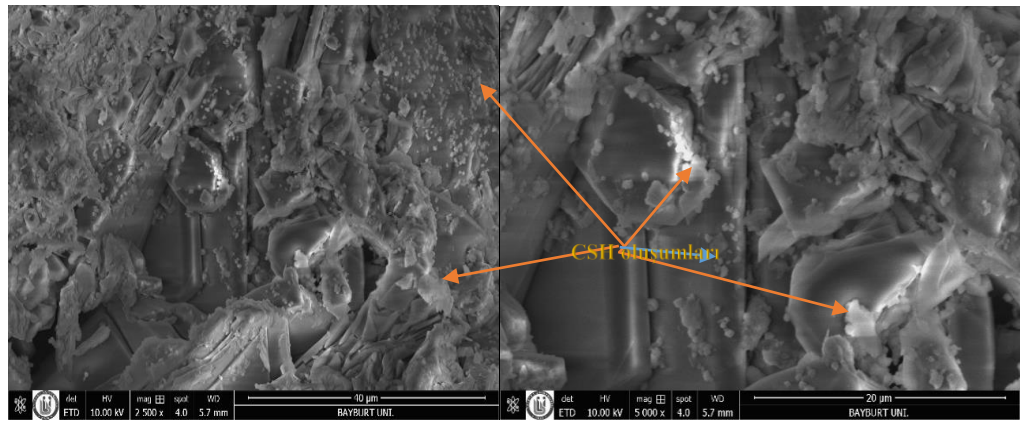
#### 3.4.1. Kirece Doymun Suda (KDS) Bekletilen YBBT Agregaları

KDS'de 30 gün bekletilen agregaların EDS analizi Şekil 60'ta verilmiştir.



Şekil 60: KDS'de 30 Gün Bekletilen YBBT Agregalarına Ait EDS Analizi

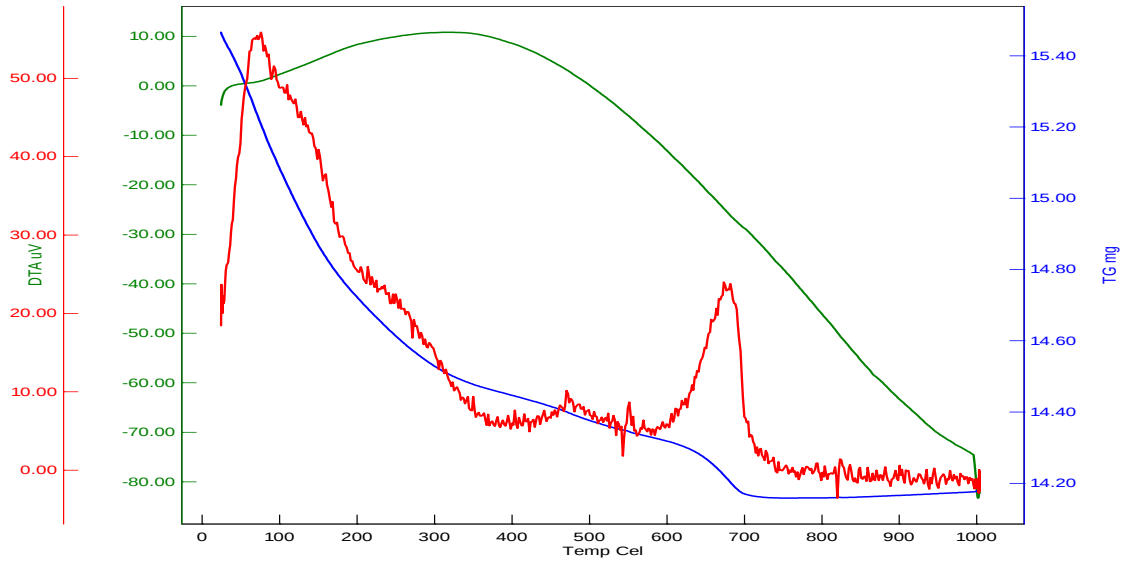
Şekil 61'de KDS'de 30 gün bekletilen agregalara ait SEM görüntüleri verilmiştir. Şekil 59'da verilen EDS analizinde kaolinit içeriğindeki kalsiyum ve potasyum yoğunluğu izlenmektedir



Şekil 61: KDS'de 30 Gün Bekletilen YBBT Agregalarına Ait SEM Görüntüleri

. Şekil 61'deki SEM görüntülerinde ise KDS'de bekletilen agregalarda CH'lerin üzerinde meydana gelen C-S-H oluşumu belirgin şekilde görülmektedir. Agregalarda oluşan yeni C-S-H yapıları nedeniyle boşluklar dolmakta ve agregaların sıkılaşıyorak daha mukavim

yapıya dönüştüğü ve bu sebeple öz dayanımlarının arttığı söylenebilir. Şekil 62’de KDS’de 30 gün bekletilen agregalara ait termal analiz eğrileri verilmiştir.



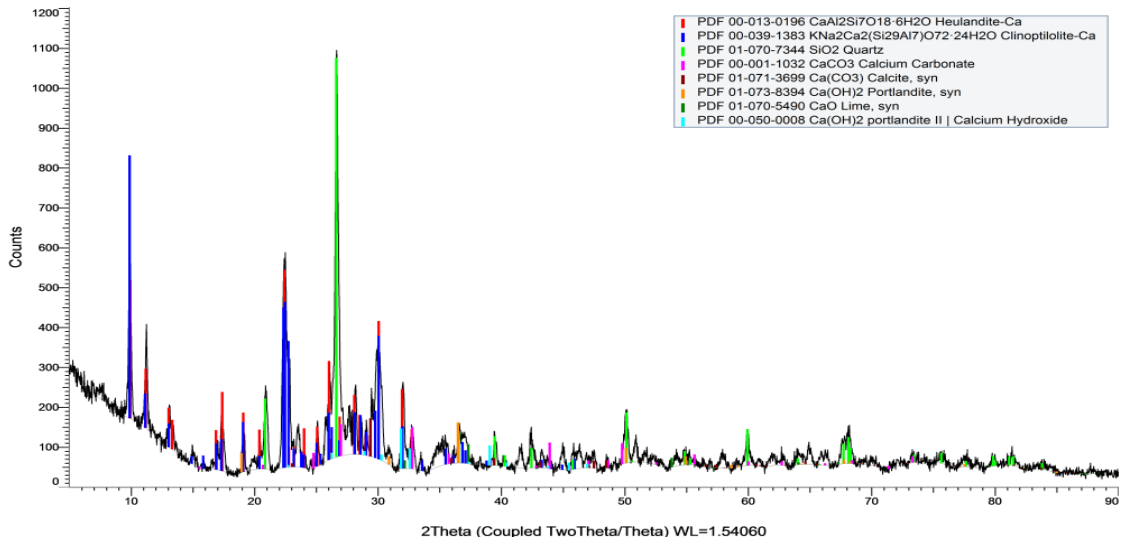
**Şekil 62:** KDS’de Bekletilen Agregalara Ait Termal Analiz Eğrileri(TG-DTG-DTA)

Şekil 62’deki termal analiz eğrilerinde; 100-300°C’de kaba nem ve kristal suyunun buharlaşması, 440°C’de kalsiyum hidroksitin dehidrasyonu, 600-700°C’deki pik ise  $\text{CaCO}_3$ ’ın kalsinasyon ile  $\text{CaO}$  ve  $\text{CO}_2$ ’ye ( $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$ ) dönüşmesine ait piklerdir. 100-500°C aralığında DTA eğrisinde gözlenen yayvan ekzotermik pik agrega içinde yer alan ve henüz reaksiyona girmemiş absorbe kalsiyum hidroksidin dehidrasyonuna ve puzzolanik reaksiyonlar sonucu oluşan C-S-H jeline ait olduğu söylenebilir. 100-720°C arasındaki TG-DTG eğrilerindeki kütle azalışı ile yürüyen pikler diğer ürünlerle birlikte aynı zamanda oluşan hidrasyon ürünlerinin bozunmasını da içermektedir.

### 3.4.2. Sodaya Doygun Suda (SDS) Bekletilen YBBT Agregaları

YBBT agregası sodalı suda bekletilmek suretiyle hızlı karbonatlaşması ( $\text{CaCO}_3$ ) sağlanarak mukavemetinin artması amaçlandı. Agregalar dökümden 30 gün önce SDS’li ortamda bekletildi. Şekil 63’te 30 gün SDS’de bekletilen agregalara ait XRD analizi verilmiştir.

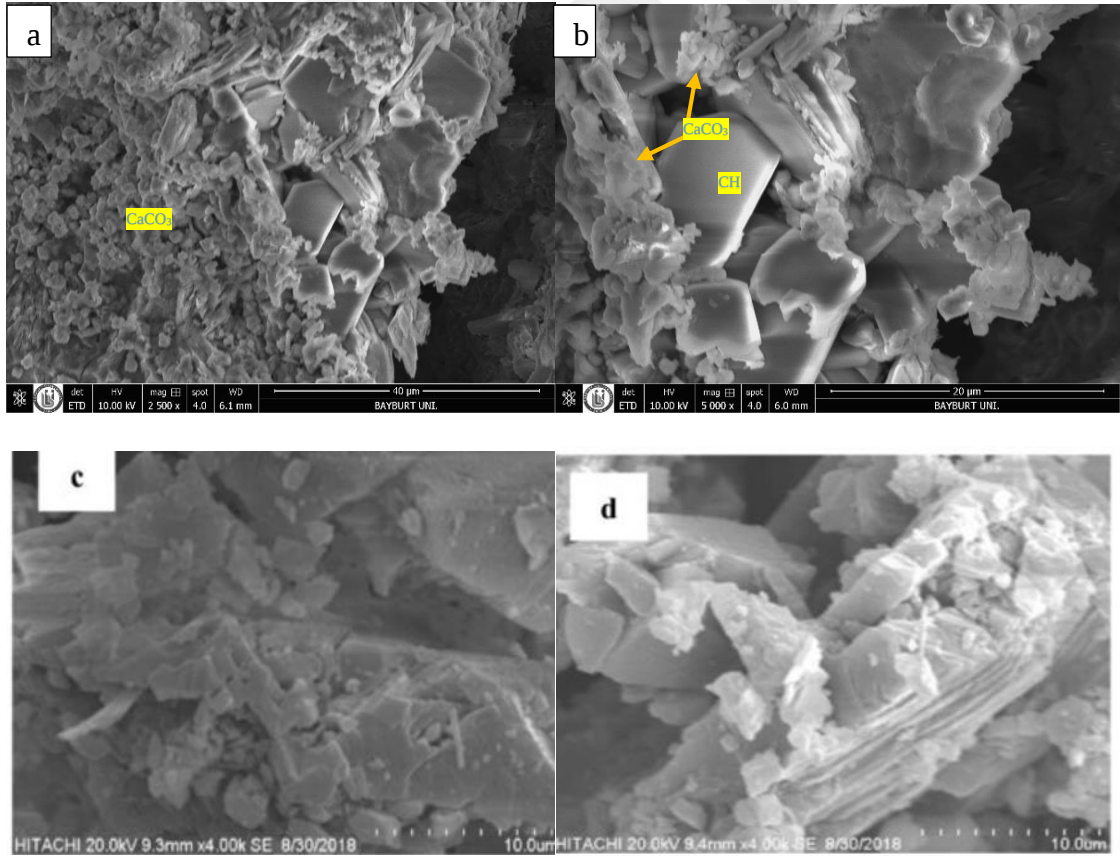
(Coupled TwoTheta/Theta)



**Şekil 63:** 30 Gün SDS’de Bekletilen YBBT Agregalarına Ait XRD Analizi

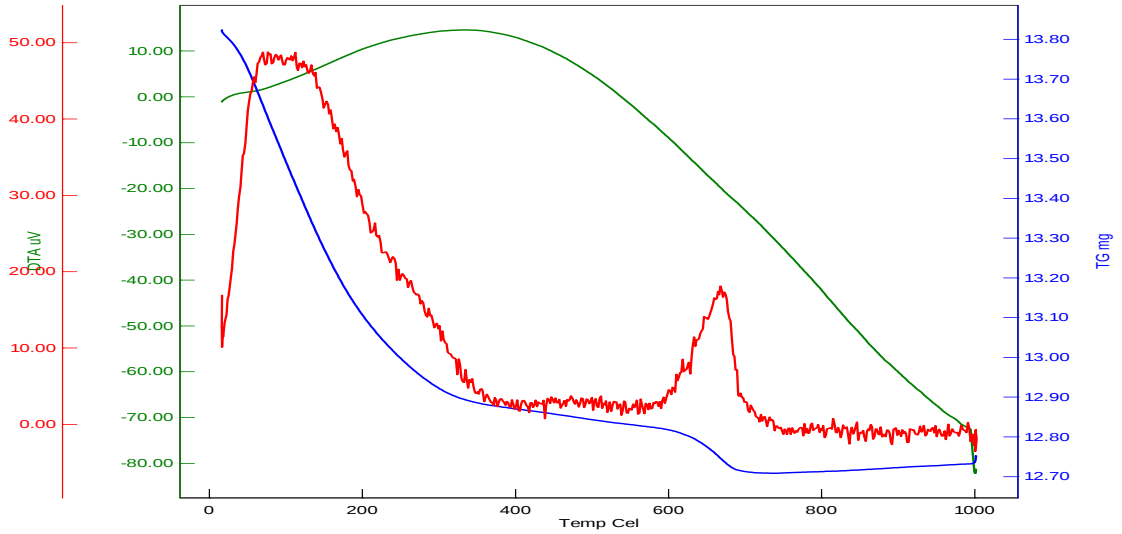
Şekil 63’ten görüldüğü gibi; kalsiyum karbonatla beraber silisyum, heulandit ve klinoptilolit şeklinde zeolitik yapıların varlığı gözlenmektedir.

Şekil 64’te SDS’de bekletilerek karbonatlaşması sağlanan agregalara ait SEM görüntüleri verilmiştir.



**Şekil 64:** SDS’de Bekletilen YBBT Agregalarına Ait Sem Görüntüleri;(a,b) BUMER; (c,d) (Kusin vd., 2020)

Şekil 65’te 30 gün SDS’de bekletilen agregalara ait termal analiz (TA) verilmiştir.

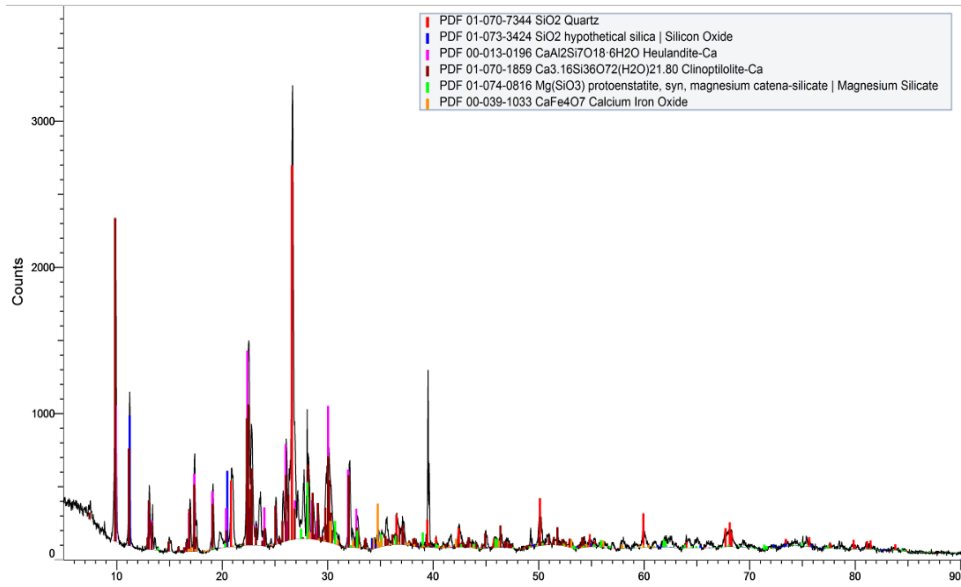


**Şekil 65:** SDS’de Bekletilen YBBT’ye Ait TG-DTG-DTA Eğrileri

YBBT’nin TG-DTG-DTA eğrilerinde, 200°C civarında belirgin şekilde kütlenin azalması ile gözlenen agregaya adsorbe sodyum karbonatın, 600-750°C kalsiyum karbonatın kalsinasyonu sonucu karbon dioksidin uzaklaşmasına  $[\text{CaCO}_3 (\text{k}) \xrightarrow{\text{ısı}} \text{CaO} (\text{k}) + \text{CO}_2 (\text{g})]$  ait piklerdir. Kalsiyum hidroksit  $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$  bir kısmının kalsiyum karbonata ( $\text{CaCO}_3$ ) dönüşmesi ile  $[\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}]$  betonun yoğunluğu artarak yüzeyde daha sıkı bir tabaka oluşur ve betonun mukavemeti iyileşir. Ayrıca eklenen soda puzolanik reaksiyonları da gerçekleşmesine sebep olmakta ve bu şekilde dayanıma katkı sağlamaktadır. Sonuç olarak, agregaların karbonatlaşmalarının sağlanması, bu agregalar ile üretilen betonların basınç dayanımlarında artışa neden olması beklenmektedir. Betonda alkali silika reaksiyonlarına neden olması bakımından sodyumun oluşturduğu risk agregaların çok iyi yıkanmasıyla bertaraf edilebilir.

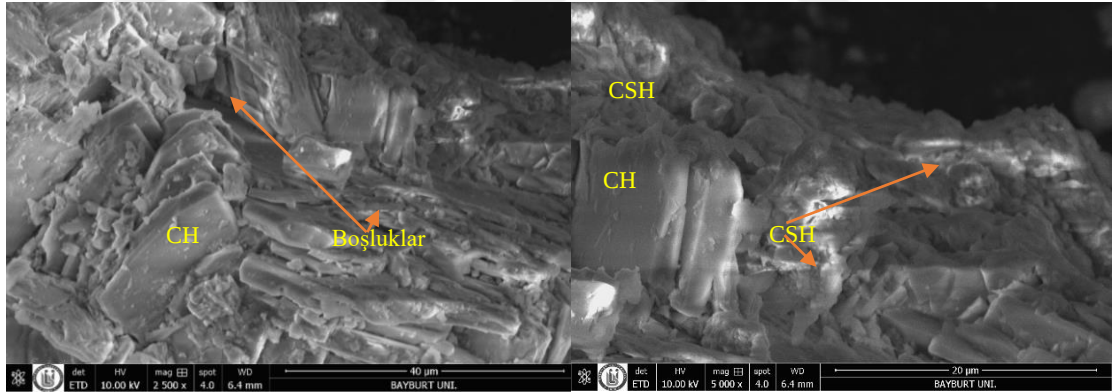
### 3.4.3. YBBT Agregalarının Suda Bekletilmesi

Burada amaçlanan, agregaları önceden suda bekletmek suretiyle hem agregaların bileşiminde bulunan ve suda çözünen bileşiklerin önceden çözünmesini sağlayarak hidrasyonun olumsuz etkilenmesini ortadan kaldırmak hem de agregada puzolanik aktivitenin agrega içinde bulunan kalsiyum hidroksit veya bazik tuzlar vasıtasıyla etkinleştirilmesini gerçekleştirmektir. Suda çözünen bileşikler uzaklaşmış olan agrega ile üretilen betonun hidrasyonu ve hidrasyonu hızlanacak, agrega ve arayüzün aderansı güçlenecek ve sonuç olarak betonun mukavemeti de artmış olacaktır. Şekil 66’da, suda 30 gün suda bekletilen YBBT agregalarına ait XRD difraktogramı verilmektedir.



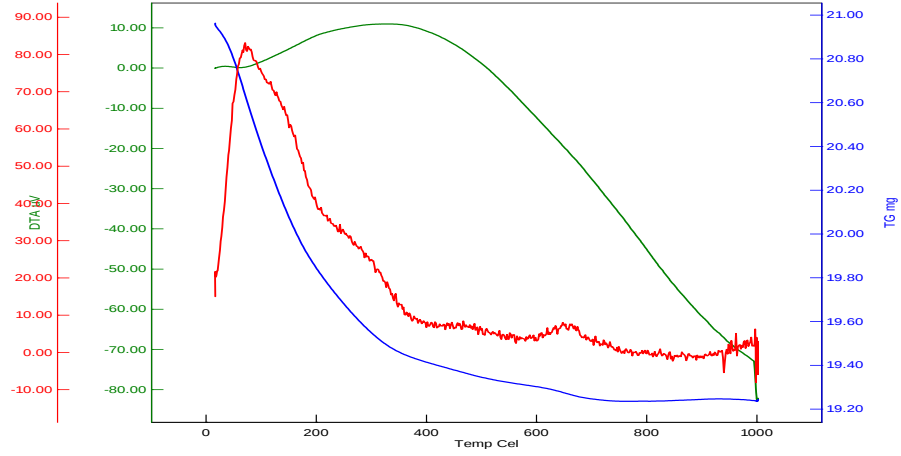
**Şekil 66:** 30 Gün Suda Bekletilen YBBT'ye Ait XRD Analizi

Şekil 66'dan görüldüğü gibi baskın oranda silisyum ve zeolit minerallerine (klinoptilolit ve heulandite) sahip YBBT agregasında, magnezyum ve yeşil renkli demir bileşiklerinin çözünerek kısmen azaldığı ve bu sayede agreganın içerisinde boşlukların oluşacağı beklenmektedir. Şekil 67'de suda bekletilen YBBT agregalarına ait SEM görüntüleri verilmektedir.



**Şekil 67:** 30 Gün Suda Bekletilen YBBT'ye Ait SEM Görüntüleri

30 gün Bayburt ili şebeke suyunda (pH:8-9) bekletilen agregaların içerisindeki magnezyum ve suda çözünebilen yeşil renkli demir bileşiklerinin kireçteki erime sonrasında boşlukların oluştuğu, daha sonra agreganın bileşiminde bulunan silisyum ( $\text{SiO}_2$ ) minerali ile kalsiyum hidrooksitin  $[(\text{CaOH})_2]$  C-S-H jelleri oluşturdukları görülmektedir. Oluşan C-S-H jellerinin boşlukları doldurduğu gözlenmektedir. Şekil 68'de YBBT agregasına ait termal analiz eğrileri verilmiştir.

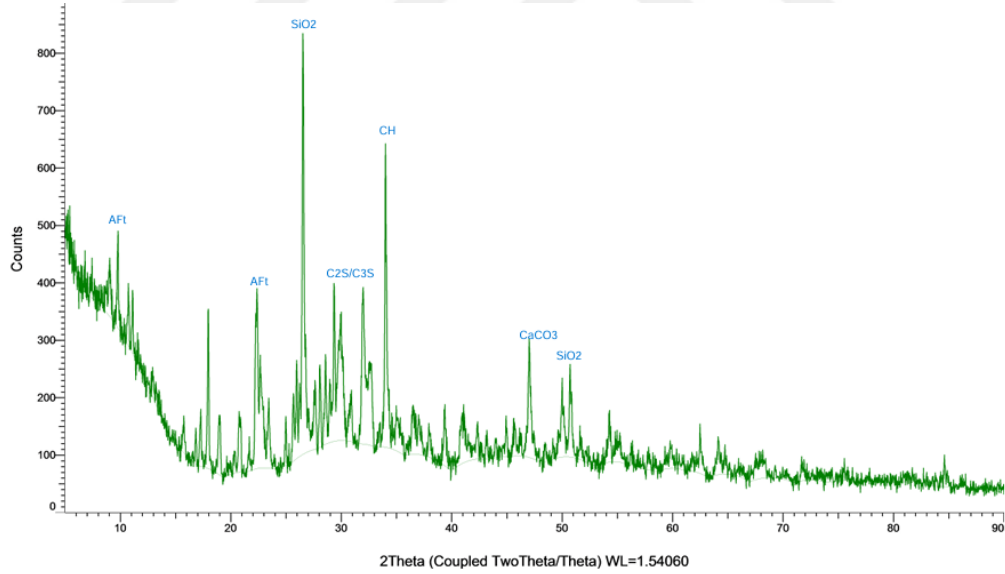


**Şekil 68:** 30 Gün Suda Bekletilen YBBT'ye Ait TG-DTG-DTA Eğrileri

TG-DTG-DTA eğrilerinde, 100-500°C'de pikler ve kütle azalmaları agregadaki bünye suyunun buharlaşmasına, 450°C civarındaki pik kalsiyum hidroksitin dehidrasyonuna, 600-750°C arasındaki pik ise kalsiyum karbonatın bozunmasına ait piklerdir.

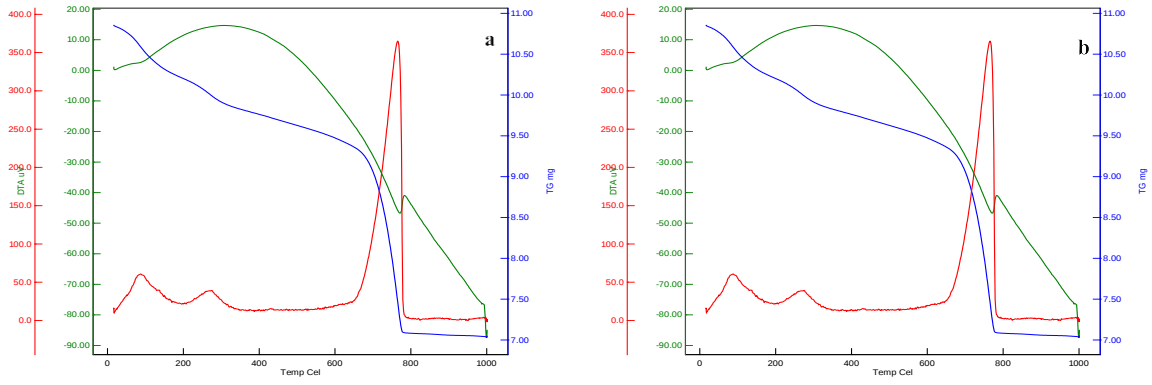
#### 3.4.4. Kirece Doygun Suda Bekletilen Agregalarla THB Üretimi

KDS'de 30 gün bekletilen agregalarla üretilmiş 28 günlük THB'lere ait XRD analizi, SEM görüntüleri ve TG-DTG-DTA eğrileri Şekil 69-71'te verilmektedir.



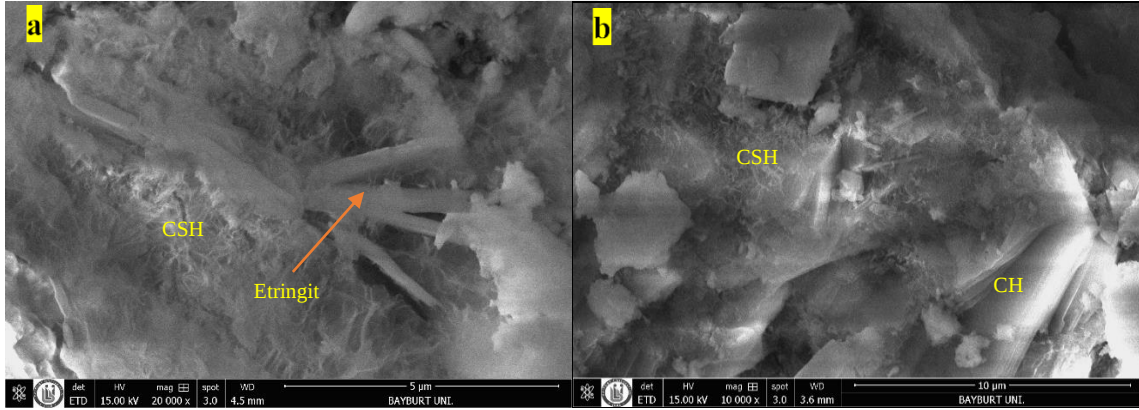
**Şekil 69:** 30 Gün KDS'de Bekletilen YBBT Agregaları ile Üretilen RBM1 Katkılı THB'lere Ait XRD Analizi

XRD analizinden görüldüğü gibi, 28 günlük KDS'de bekletilerek üretilen RBM1 katkılı THB'de hâkim yapıların  $C_2S$  / $C_3S$  ile beraber  $SiO_2$  ve  $CaCO_3$  yapıları izlenmektedir. Ayrıca etringit pırları da izlenmektedir.



**Şekil 70:** 30 Gün KDS’de Bekletilen YBBT Agregaları ile Üretilen RBM1 Katkılı THB’lere Ait TG-DTG-DTA Eğrileri; (a) 28 Günlük, (b) 90 Günlük

30 gün KDS’de bekletilen agregalarla üretilmiş RBM1 içeren THB’lere ait DTA/TG /DTG analizlerinde, agregalardan farklı olarak 100-200°C arasındaki pikler arasında etringit ve C-S-H jellerinin bozunmasına ait piklerdir. 440°C civarındaki kalsiyum hidroksite ait pikin küçülmüş olması çimento hidrasyonu sonucu oluşan ve kireçli ortamda bekleme sırasında ortama geçen kalsiyum hidroksitin puzzolanik reaksiyonlar sonucu önemli oranda tüketildiğini göstermektedir. Termogramlarda 700-800°C’de gözlenen pik ise  $\text{CaCO}_3$ ’ün dekarbonasyonuna ve C-S-H jellerinin bozunmasına ait piklerdir. DTA eğrilerinde 100-600°C civarındaki yayvan ekzotermik pik agregayla ilgili puzzolanik reaksiyonların sıcaklığın artışıyla gerçekleşmesiyle ilgilidir (Duvarcı vd., 2007).



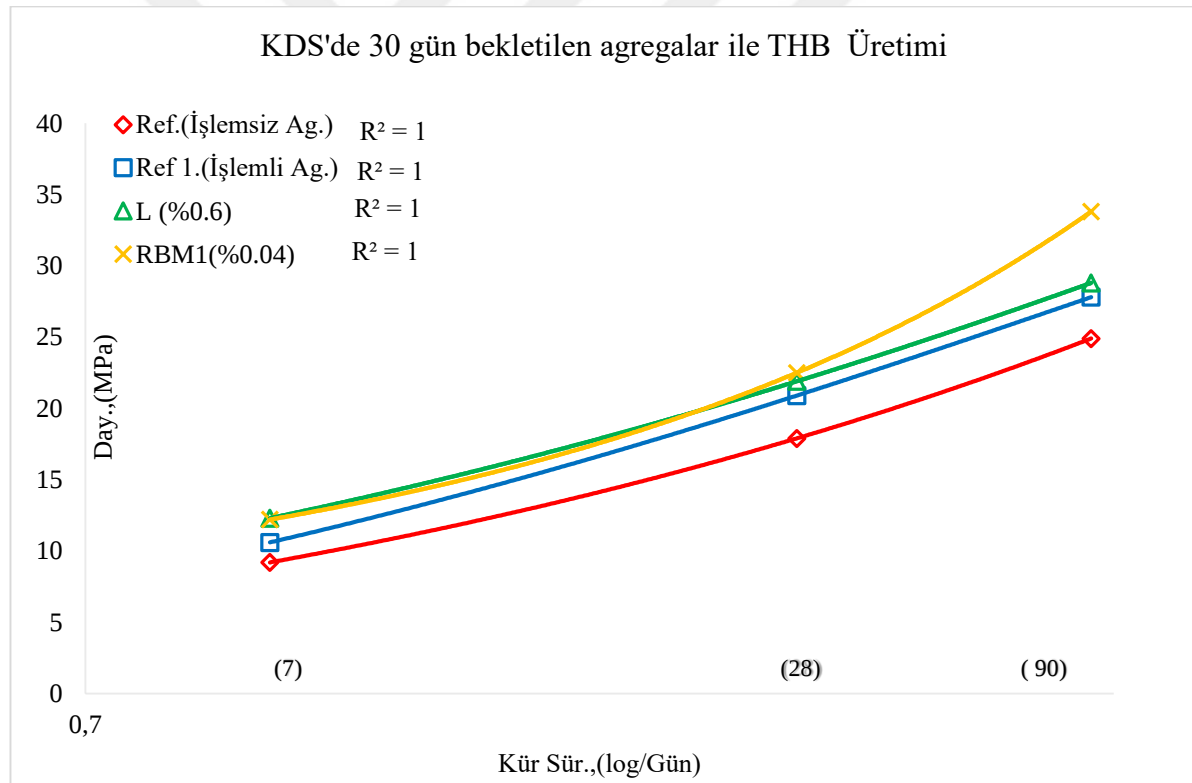
**Şekil 71:** 30 Gün Kirece Doygun Suda Bekletilen YBBT Agregaları ile Üretilen RBM1 Katkılı THB’lere Ait SEM Görüntüleri; (a) 28 Günlük, (b) 90 Günlük

SEM görüntülerinde KDS’de bekletilen THB’lerde, 90 gün sonunda etringitlerin C-S-H yapıları ile kaplanmış olduğu görülmektedir. YBBT agregaları ile üretilen THB’lerin 28 ile 90, günlerde sıkı bir şekilde C-S-H yapıları, etringit ve kalsiyum hidroksit yapılarının varlığı görülmektedir. Tablo 30’da 30 gün KDS’de bekletilen YBBT agregaları ile üretilen THB’lere ait mekanik özellikleri verilmiştir.

**Tablo 30:** YBBT Agregalarının KDS’de 30 Gün Bekletildikten Sonra Üretilen THB’lerden Elde Edilen Sonuçlar

| THB/Katkı                       | Ref. (işlemsiz) | Ref.1,(İşlemlı ag., Katkısız) | L     | RBM1  |
|---------------------------------|-----------------|-------------------------------|-------|-------|
| Katkı Or., (%)                  | 0               | 0                             | 0,6   | 0,04  |
| 7g, Day (MPa)                   | 9,2             | 10,6                          | 12,3  | 12,2  |
| 28g, Day,, (MPa)                | 17,9            | 20,9                          | 21,9  | 22,5  |
| 90g, Day,, (MPa)                | 24,9            | 27,8                          | 28,8  | 33,8  |
| 28g DBHA, (gr/cm <sup>3</sup> ) | 5,5             | 1,907                         | 1,882 | 1,906 |
| Slump, (cm)                     | 0,55            | 5,2                           | 6,5   | 6,5   |
| S/Ç                             | 1868            | 0,46                          | 0,37  | 0,45  |

Şekil 72’de 30 gün KDS’de bekletilen YBBT agregaları ile üretilen THB’lere ait 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları gösterilmiştir.



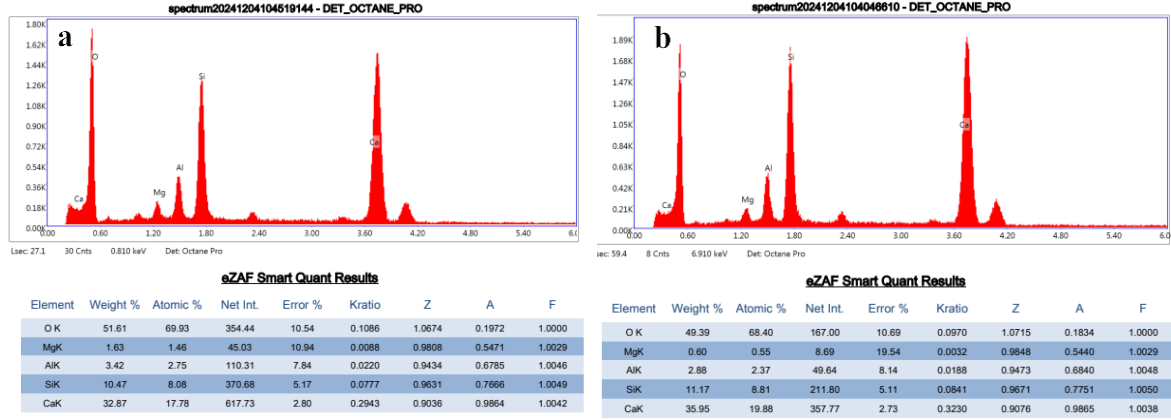
**Şekil 72:** 30 Gün KDS’de Bekletilen YBBT İle Üretilen THB’lere Ait Sonuçlar

Şekil 72’den görüldüğü gibi agregaları KDS’de bekleterek mukavemetinin iyileştirilmesi, bu agregalarla üretilen THB basınç dayanımlarına da yansımış ve basınç dayanım değerleri artmıştır. Elde edilen sonuçlarda, iyileştirilen agregalarla üretilen THB’lerin basınç dayanım değerleri iyileştirilme yapılmayan agregalar ile üretilen THB’nin basınç dayanım değerinden 28 günde %16,7- 25,7 arasında, 90 günde %16,2 - 49,7 arasında değişen

oranlarda artış göstermiştir. THB’lerde 90 gün sonunda meydana gelen %49,7 artışta, agregalarda uzun dönemde gelişen pozolanik aktivite etkili olmuştur.

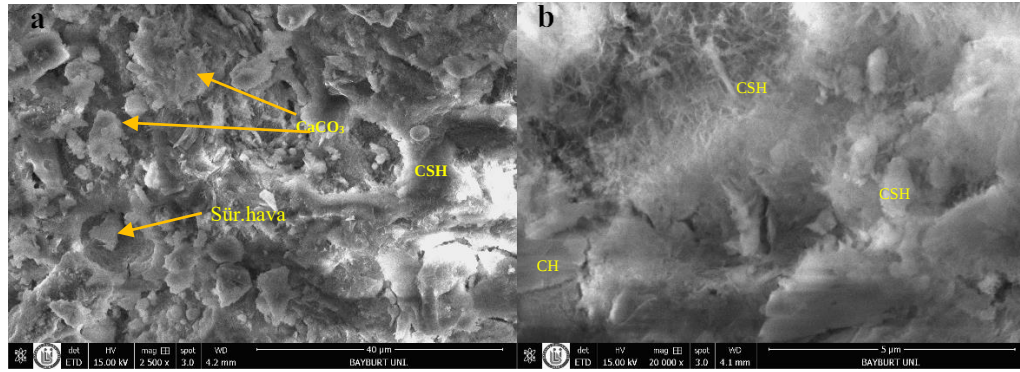
### 3.4.5. Sodalı Suda Bekletilen Agregalarla THB Üretimi

Şekil 73’te SDS’de bekletilen agregalarla üretilen THB’lere ait EDS analizi verilmektedir.



**Şekil 73:** 30 Gün Sodaya Doymun Suda Bekletilen YBBT Agregaları İle Üretilen Lignin Katkılı THB’lere Ait EDS Analizi; (a) 28 Günlük, (b) 90 Günlük

Şekil 73’te verilen EDS analizinde sodalı suda bekletilen agregalarla üretilmiş THB’lerin 28 ve 90 gün sonunda kalsiyum, silisyum ve oksitlerin baskın oranda mevcut olduğu görülmektedir. Bu elementlerin varlığı baskın bir şekilde C-S-H yapılarına işaret etmektedir. Şekil 74’te SDS’de bekletilen agregalarla üretilen THB’lere ait SEM görüntüleri verilmektedir.

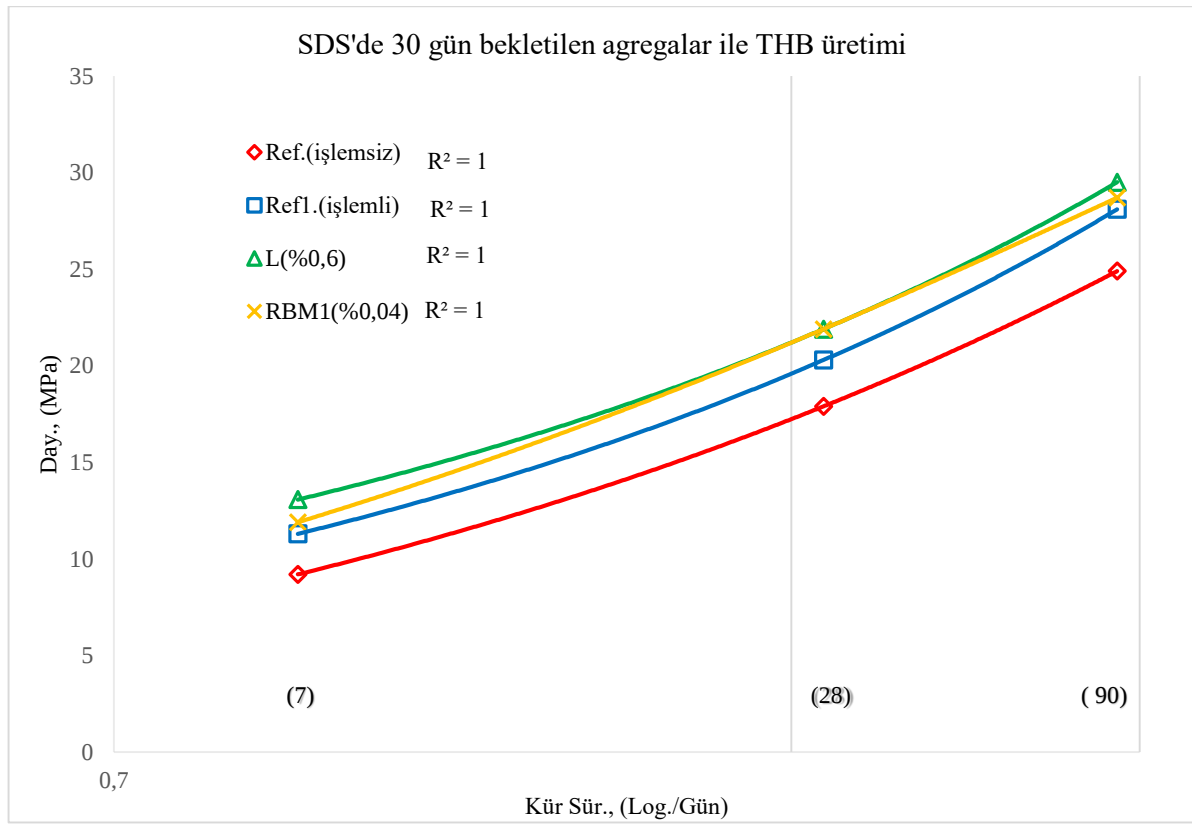


**Şekil 74:** 30 gün SDS’de Bekletilen YBBT Agregaları ile Üretilen Lignin Katkılı THB’lere Ait SEM Görüntüleri; (a) 28 Günlük, (b) 90 Günlük

Şekil 74’te ligninin sürüklediği hava ile beraber  $\text{CaCO}_3$  yapıları ve özellikle beklendiği gibi betonda ileri yaşlarda pozolanik aktivitenin de gerçekleşmesi ile 90 günlük betonlarda sıkı şekilde C-S-H oluşumları görülmektedir. Tablo 31 ve Şekil 75’te SDS’de bekletilen agregalarla üretilen THB’lere ait deney sonuçları verilmiştir.

**Tablo 31:** YBBT Agregalarının SDS’de 30 Gün Bekletildikten Sonra Üretilen THB’lerden Elde Edilen Sonuçlar

| Katkı Adı                        | Ref. (işlemsiz) | Ref.1,(İşlemlı ag., Katkısız) | L     | RBM1  |
|----------------------------------|-----------------|-------------------------------|-------|-------|
| Katkı Or., (%)                   | 0               | 0                             | 0,6   | 0,04  |
| 7g, Day., (MPa)                  | 9,2             | 11,3                          | 13,07 | 11,9  |
| 28g, Day., (MPa)                 | 17,9            | 20,3                          | 21,9  | 21,9  |
| 90g, Day., (MPa)                 | 24,9            | 28,1                          | 29,5  | 28,7  |
| Slump, (cm)                      | 5,5             | 4,9                           | 5,4   | 6,5   |
| S/Ç                              | 0,55            | 0,49                          | 0,37  | 0,45  |
| 28g, DBHA, (gr/cm <sup>3</sup> ) | 1868            | 1,894                         | 1,875 | 1,904 |



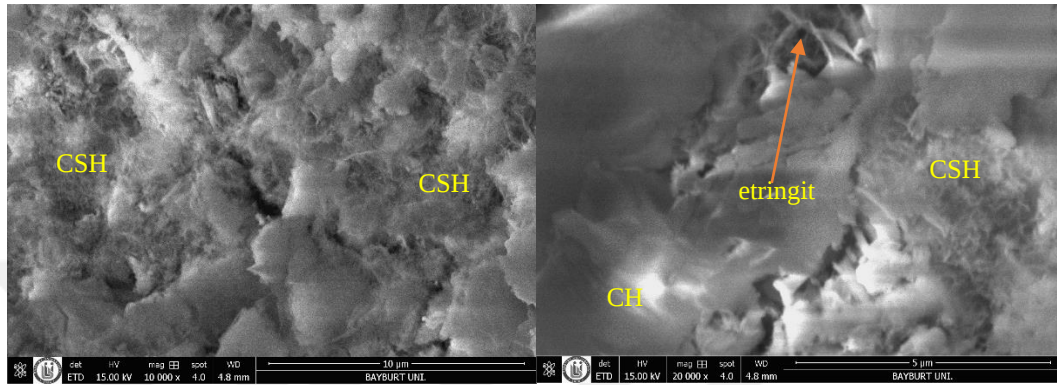
**Şekil 75:** SDS’de Bekletilen YBBT ile Üretilen THB’lere Ait Grafik

Şekil 75’ten görüldüğü gibi herhangi bir işleme tabi tutulmayan agregalar ile üretilen beton, 28 gün sonunda 17,9 MPa basınç dayanım değerine sahiptir. SDS’de bekletilerek üretilen THB’lerin 28 günlük basınç dayanımları, referans betonundan (işlemsiz agregalar ile üretilen) %13-22 arasında değişen değerlerde artış göstermiştir. Burada lignin katkılı serinin, hava sürüklemesine rağmen basınç dayanımının yüksek olması dikkat çekmektedir. RBM1 katkılı seri, referans ve kontrol betonundan %2-15,2 arasında değişen oranlarda daha yüksektir.

Buradan anlaşıldığı gibi RBM1 katkısının su kesme değerlerine bağlı olarak basınç dayanım değerleri artmaktadır.

### 3.4.6. Suda Bekletilen Agregalarla THB Üretimi

Şekil 76’te 30 gün suda bekletilen YBBT agregası ile üretilen THB’lere ait SEM mikrofotografisi verilmektedir.



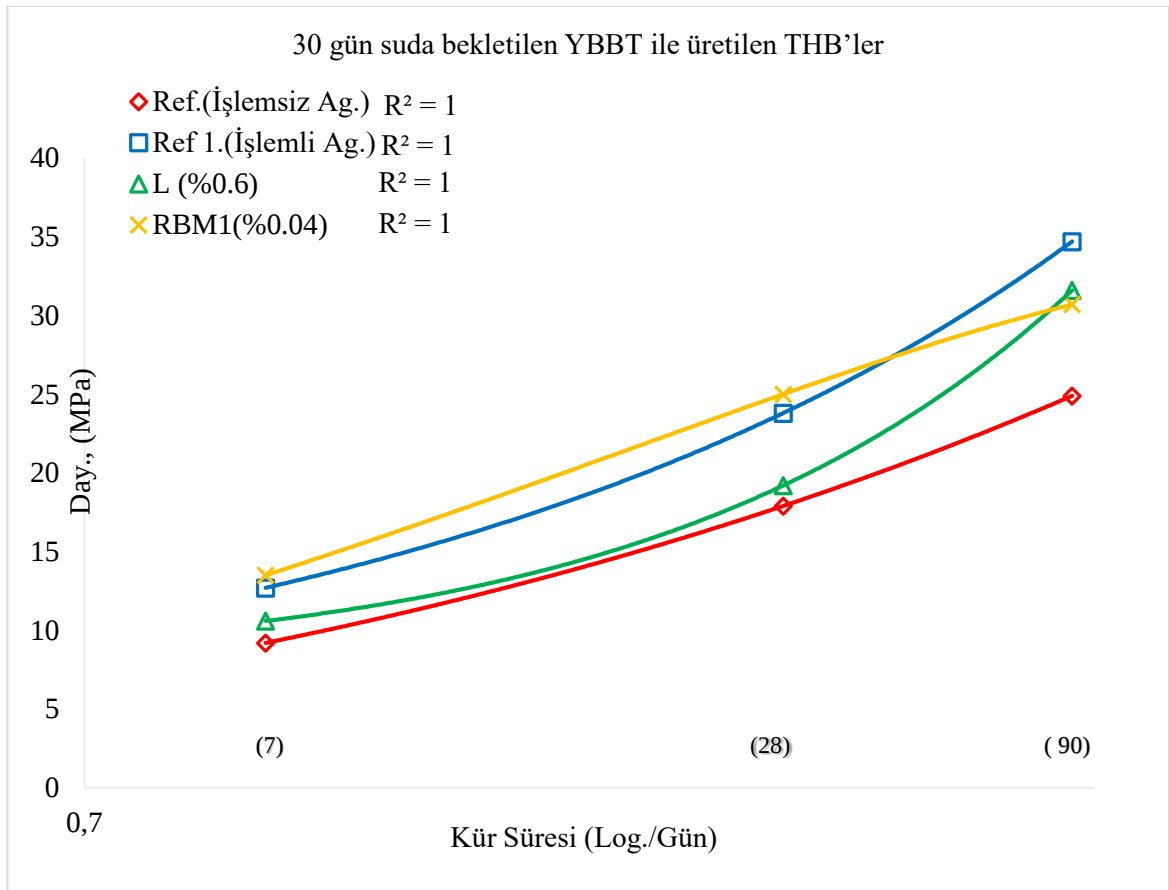
**Şekil 76:** 30 Gün Suda Bekletilen YBBT Agregaları ile Üretilen Lignin Katkılı THB’lere Ait SEM Görüntüleri; (a) 28 Günlük, (b) 90 Günlük

Şekil 76’daki THB’lere ait SEM görüntülerinde, baskın bir şekilde C-S-H varlığı dikkat çekmektedir. Bu durum beklendiği gibi 7 ve 28 gün dayanımlarında hidrasyonun hızlı bir şekilde oluştuğunu sonuç olarak 90, güne kadar artarak devam ettiğini işaret etmektedir. Tablo 32’de 30 gün suda bekletilen agregalar ile üretilen THB’ye ait sonuçlar verilmektedir.

**Tablo 32:** YBBT Agregalarının Suda 30 Gün Bekletildikten Sonra Üretilen THB’lerden Elde Edilen Sonuçlar

| Katkı Adı                        | Ref. (işlemsiz) | Ref.1,(İşlemlı ag., Katkısız)L | RBM1  |
|----------------------------------|-----------------|--------------------------------|-------|
| Katkı Ora., (%)                  | 0               | 0                              | 0,6   |
| 7g, Day., (MPa)                  | 9,2             | 12,2                           | 10,6  |
| 28g, Day., (MPa)                 | 17,9            | 23,8                           | 19,2  |
| 90g, Day., (MPa)                 | 24,9            | 34,7                           | 31,6  |
| Slump, (cm)                      | 5,5             | 7                              | 7,2   |
| S/Ç                              | 0,55            | 0,44                           | 0,37  |
| 28g, DBHA, (gr/cm <sup>3</sup> ) | 1868            | 1,908                          | 1,839 |

Şekil 77’de suda bekletilen agregalar ile üretilen THB’lerin mekanik özellikleri verilmiştir.



**Şekil 77:** 30 Gün Suda Bekletilen YBBT ile Üretilen THB'lere Ait Sonuçlar

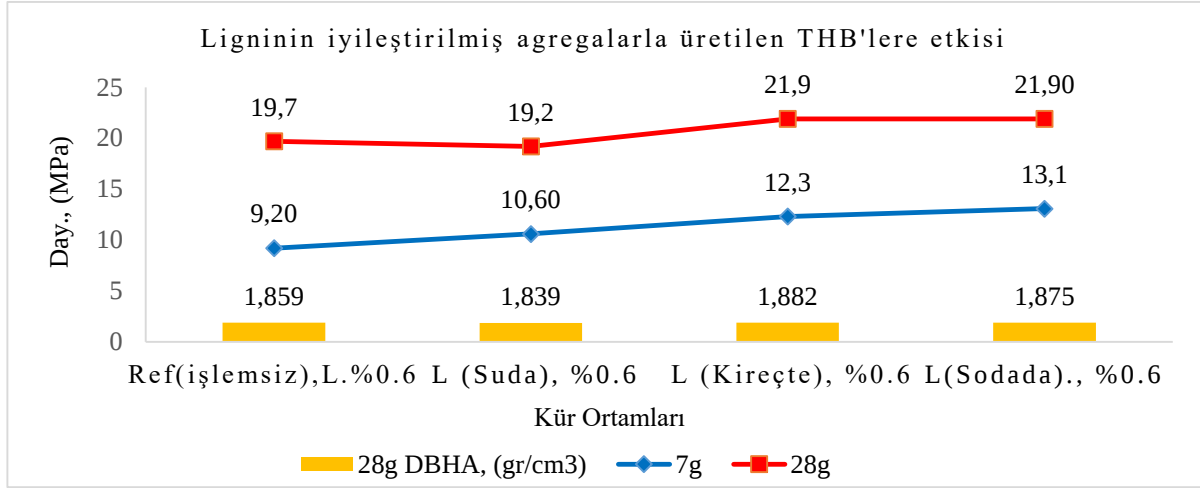
THB'lerin 28 gün kür sonunda elde edilen basınç dayanım değerleri incelendiğinde, agregaların önceden suda bekletilmesi ile agregadaki mineraller (magnezyumlu ve demirli bileşikler) suda çözünmüş ve oluşan boşlukların yerini çimento hamuru ve hidrasyon ürünleri doldurmuştur. Bu agregalar ile üretilen THB'lerin basınç dayanımları, referans betonundan (İyileştirilmeyen agrega ile üretilen THB) %7-39 arasında değişen değerlerde artış göstermiştir. Burada ayrıca hidrasyonun hızlanması ile ilk dayanımların (7 günlük) referans agregası ile üretilen THB'lere göre (%15,2- 46,7) arttığı görülmektedir. Sonuç olarak agregaların önceden suda bekletilerek hem çözünmeleri hem de pozolanik aktivitelerinin başlatılması ile agregaların mukavemet özellikleri iyileşmekte ve buna bağlı olarak üretilen HB'lerin hem erken dayanımı hem de muavemet özellikleri olumlu şekilde gelişmektedir.

YBBT agregalarındaki magnezyum, demir vb, bileşiklerin çözünüp uzaklaşmasıyla arayüz aderansı güçlenmekte bu durumun sonucu olarak özellikle 90. gün dayanımlarında ciddi artış olmaktadır.

### 3.4.7. Ligninin İyileştirme Yapılan Agregalar İle Üretilen THB'lerdeki Etkisi

Şekil 78'de ligninin şebeke suyunda, kirece doymuş suda ve sodalı suda gösterdiği etki grafik olarak verildi. Karışımlara çimento ağırlığının %0,6'sı oranında katı madde olarak

katılan lignin, akışkanlaştırıcı etkiyi en fazla sodalı suda bekletilen agregalar ile üretilen THB'lerde göstermiştir. Lignin, agregalarda herhangi bir işlem yapılmayan referans betonu serisinde agregalar tarafından daha fazla emilerek etkisi azaldığı için en düşük etkiyi (17,9 MPa) gösterdiği görülmektedir.

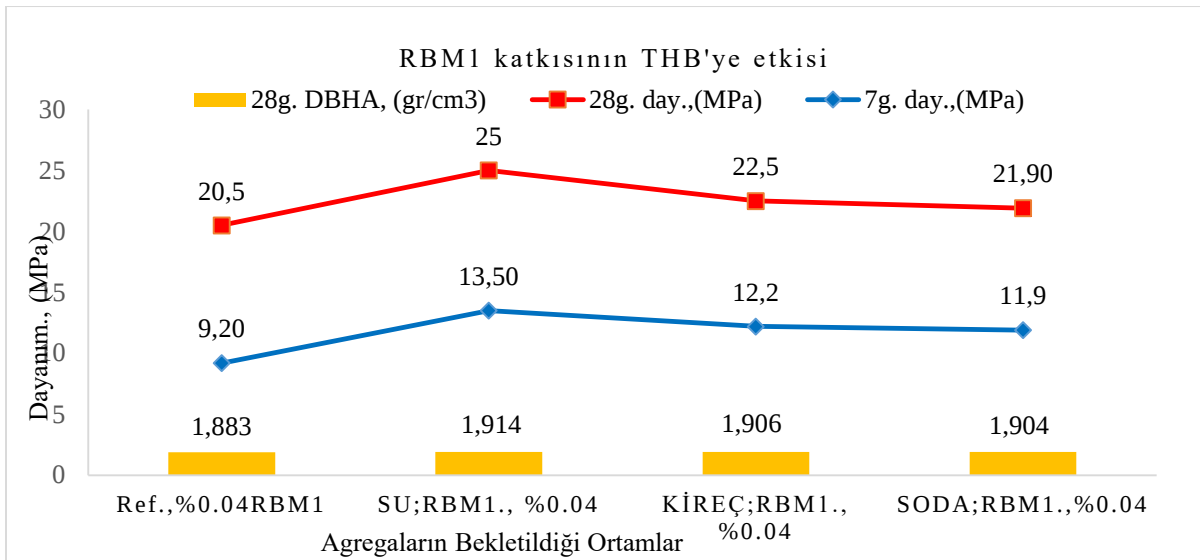


**Şekil 78:** Lignin Katkısının İyileştirme Yapılan Agregalar ile Üretilen THB'lerdeki Etkisi

Lignin katkılı THB serilerinde, şebeke suyunda ve kirece doygun suda bekletilen agregalarla üretilen THB akışkanlaştırıcı özelliğini daha fazla göstererek dayanım artışına (21,90 MPa) katkı sağlamıştır. Sonuç olarak katı madde olarak karışıma katılan lignin, iyileştirilen agregalar tarafından fazla emilmemiş ve gerçek etkisi olan hava sürüklenme/kayganlaştırma özelliğinin bu agregalarla üretilen THB serilerinde daha iyi ortaya çıkmasına neden olmuştur.

### 3.4.8. RBM1 Katkısının İyileştirme Yapılan Agregalar İle Üretilen THB'lerdeki Etkisi

Şekil 79'da, %0,04 RBM1 katkının, iyileştirme yapılan agregalarla üretilen THB'lerdeki etkisi görülmektedir. Burada iyileşen agregalarla üretilen THB serilerinde, referans betonuna göre dayanım artışı görülmektedir. RBM1 katkısı 28 günlük basınç dayanımlarında en fazla etkiyi Bayburt şehir şebeke suyunda bekletilen agregalarla üretilen THB serisinde göstermiştir (25 MPa). RBM1 katkısı, kirece doygun suda ve sodalı (Sodyum karbonalı) suda bekletilen agregalarla üretilen THB'lerde birbirine yakın etki göstermiştir.



**Şekil 79:** RBM1 Katkısının İyileştirme Yapılan Agregalarla Üretilen THB’lerdeki Etkisi

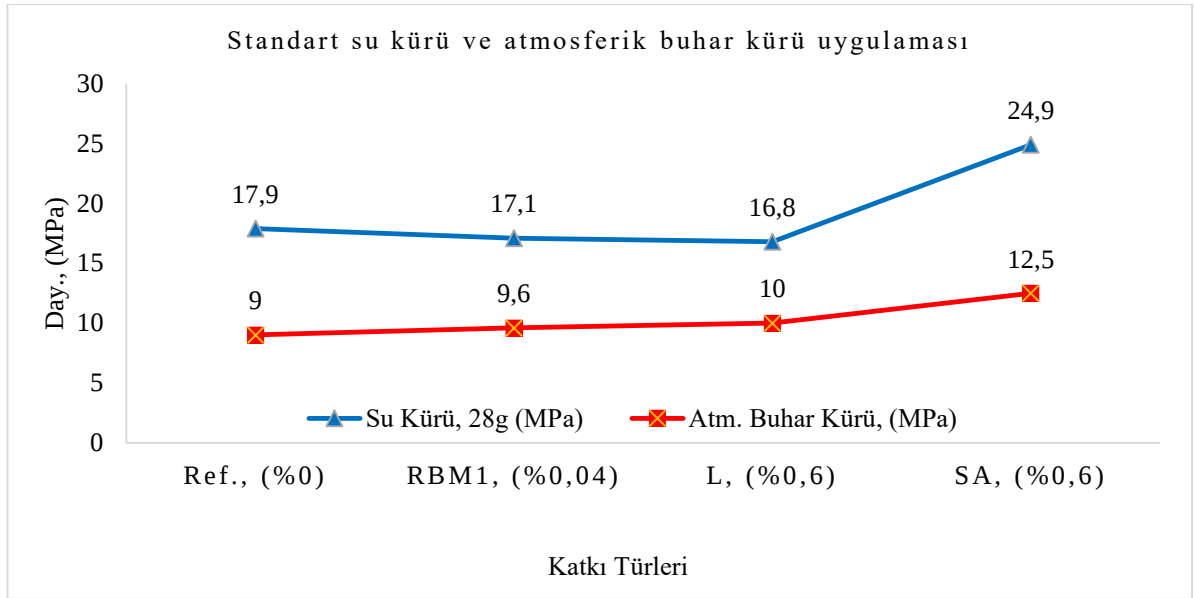
Sonuç olarak, iyileştirilen agregalarla üretilen RBM1 (Amber CA-N) katkılı THB serilerindeki (gerçekleşen su kesme değerlerinden dolayı) Su/Çimento oranlarındaki azalma gerçekleştiği ve ayrıca agregaların mukavemetleri arttığı için THB’nin basınç dayanımı da %6,8-21,9 arasında değişen değerlerde artmıştır.

#### 3.4.9. YBBT Agregaları İle Üretilen THB’lere Atmosferik Buhar Kürü Uygulaması

YBBT agregaları ile üretilen THB’lere TS 3648’e uygun olarak atmosferik buhar kürü uygulandı. THB’lerin hızlı dayanım kazanmasını sağlamak için 80-100°C derece sıcaklıktaki buhar küründe 12 saat kür edildi. Daha sonra standart kürleme ile karşılaştırma yapabilmek için, buhar küründen elde edilen basınç dayanım değerleri, aynı serinin 28 gün standart kür edilen numunelerin basınç dayanım değerleri ile karşılaştırıldı. Tablo 33 ve Şekil 80’de KDS’de 30 gün bekletilen YBBT agregaları ile üretilmiş THB’lere uygulanan atmosferik buhar kürü uygulamasından elde edilen sonuçlar verilmiştir.

**Tablo 33:** KDS’de 30 Gün Bekletilen YBBT Agregaları ile Üretilmiş THB’lere Atmosferik Buhar Kürü Uygulamasının Sonuçları

|                  |       | Standart Kür     | Atmosferik Buhar Kürü |            |
|------------------|-------|------------------|-----------------------|------------|
|                  |       | Ref., (Katkısız) | RBM1, (%0,04)         | SA, (%0,6) |
| Çökme,           | (cm)  | 5,5              | 6                     | 4          |
| S/Ç              |       | 0,55             | 0,41                  | 0,37       |
| Su Kürü (28g),   | (MPa) | 17,9             | 17,1                  | 16,8       |
| Atm. Buhar Kürü, | (MPa) | -                | 9,6                   | 10         |



**Şekil 80:** KDS’de 30 Gün Bekletien YBBT Agregaları ile Üretilmiş THB’lere Atmosferik Buhar Kürü Uygulamasının Sonuçlarına Ait Grafik

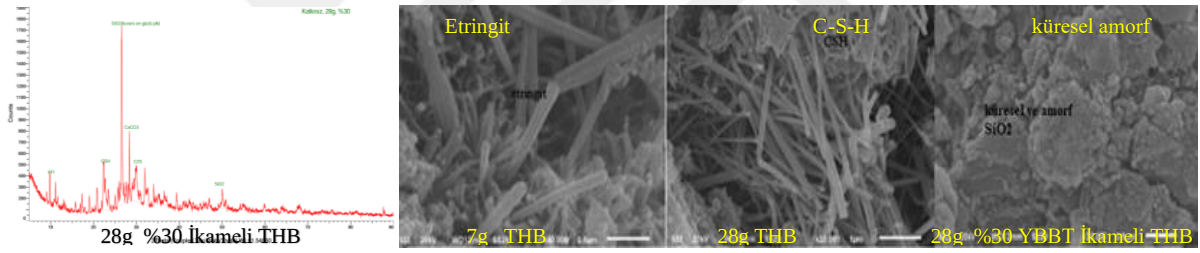
Şekil 80’den görüldüğü gibi THB numunelerinin atmosferik buhar kürlenmesi ile dayanım değerlerinde, 28 günlük normal kür edilen THB’lerin basınç dayanım değerlerinden %70-95 arasında değişen oranlarda azalma meydana gelmiştir. Literatürde atmosferik buhar kürü uygulamasının betonun 28 günlük basınç dayanımlarında %5-15 oranında dayanım kaybı verdiği belirtilmektedir (Kurbetçi, 2022). Burada daha fazla dayanım kaybı meydana gelmesi, zeolitik yapıdaki agregalarda uzun kür periyotlarında oluşan puzzolanik aktivite nedeniyle dayanımın daha yüksek olmaması ve uygulanan kürleme sıcaklığının yüksek olması ile açıklanabilir.

### 3.5. BBT VE YBBT’NİN ÇİMENTO İKAME MALZEMESİ OLARAK KULLANILMASI

Bu bölümde, volkanizma sonucu oluşan ve bileşiminde %70  $\text{SiO}_2$  ihtiva eden zeolitik yapıdaki BBT ile YBBT filler malzemesinin, çimento ikame malzemesi olarak kullanılabilirliği araştırıldı. Tez kapsamında, işletmelerden getirilen BBT ve YBBT’ler 1-2 mm aralığında ufaltıldıktan sonra etüvde  $100 \pm 2$  derecede sabit ağırlığa gelene kadar kurutuldu. Kurutulan malzeme, bilyeli öğütücüde %98’i 63 ve %78’i 45 mikron elekten geçecek şekilde öğütülerek çimento ikame malzemesi olarak kullanıldı. Karışım serilerine çimento ağırlığının %0,04’ü RBM1 ve %0,6’sı oranında lignin eklendi. Lignin akışkanlaştırıcı ve hava sürükleyici özelliklerinin araştırılması amacıyla THB serileri üretildi. Çökme değerleri S2 (4-9 cm) sınıfında sabit tutuldu.

### 3.5.1. THB Üretiminde YBBT'nin Çimento İkame Malzemesi Olarak Kullanılması

Zeolitik yapıda bulunan YBBT agregasının pozolanik aktivitesi önceki çalışmalarda belirlenmiştir (6,2 MPa). Bu bölümde üretilen THB serilerine, 0-63µm arası yıkanmış ve öğütülmüş (%92'si 45 µm altı) YBBT agrega tozu; %0, %10, %20, %30 ve %40 oranlarında çimentoya ikame edilerek en az 30 MPa basınç dayanımında THB üretimi hedeflendi. Burada amaçlanan, çimento miktarını azaltarak maliyetin düşürülmesi ve THB'lerde özellikle 28. ve 90. günlerde gerçekleşmesi beklenen pozolanik reaksiyonlar ile birlikte THB'lerin basınç dayanımlarındaki artışın izlenmesidir. YBBT agregaları önceden KDS'de bekletilmek suretiyle agregaların öz dayanımlarında iyileşme ile birlikte akışkanlaştırıcı/su azaltıcı katkı maddeleri kullanılarak 30 MPa dayanımında THB üretimi hedeflendi. %30 YBBT tozu ikame edilen THB serilerinin 7 ve 28 gün kür periyotları sonunda kırılmaları gerçekleştirildi. Kırılan yüzeylerin agrega-pasta arayüzündeki pasta kısmından numuneler alınarak izopropil alkol içerisinde bekletilmek suretiyle hidrasyonları durduruldu. Burada amaçlanan, 7 ve 28 gün kür periyotları sonunda THB'lerde oluşan yapılarındaki farkları tespit etmektir. Çekilen XRD difraktogramı ve SEM mikrografları şekil 81'de verilmektedir.



**Şekil 81:** İzopropil Alkol İçerisinde Bekletilerek Hidrasyonu Durdurulmuş Beton Numunelerinin XRD Analizi ve SEM Görüntüleri

Şekilden görüldüğü gibi 7 günde etringit yapılarının, 28 günde ise etringit ile beraber CSH yapılarının baskın olduğu görülmektedir. 28 gün sonunda %30 YBBT agregası ikame edilen seride, küresel şekilli ve amorf halde bulunan SiO<sub>2</sub> yoğun olarak izlenmektedir. Tablo 35'te YBBT toz malzemesi ikame edilerek üretilen THB'lere ait sonuçlar toplu olarak verilmiştir. 28 gün sonunda ikame edilmeyen betonun basınç dayanımı (20,6 MPa) aynı periyot süresi sonunda %30 YBBT tozu ikame edilen betonun basınç dayanımından (10,6) %48,5 daha düşük çıkmıştır. Buradan anlaşıldığı gibi ikame oranının artmasıyla basınç dayanımları düşmüştür.

**Tablo 34:** Katkıların YBBT Tozu İkame Edilerek Üretilen THB'lere Etkisi

| Katkısız Seri               |       |      |       |       |
|-----------------------------|-------|------|-------|-------|
| YBBT İkame Or., (%)         | 0%    | 10%  | 20%   | 30%   |
| 7g Day., (MPa)              | 12,6  | 7,7  | 7,5   | 4,7   |
| 28g Day., (MPa)             | 20,6  | 14,4 | 12,7  | 10,6  |
| 90g Day., (MPa)             | 37,2  | 20,6 | 19,6  | 19,2  |
| 28g DBHA, g/cm <sup>3</sup> | 1,935 | 1,88 | 1,871 | 1,866 |
| Su/Çim.,%                   | 0,44  | 0,5  | 0,5   | 0,44  |

| Lignin Katkılı Seri         |       |       |       |       |
|-----------------------------|-------|-------|-------|-------|
| YBBT İkame Or., (%)         | 0%    | 10%   | 20%   | 30%   |
| 7g Day., (MPa)              | 10,2  | 10,7  | 9,4   | 7,2   |
| 28g Day., (MPa)             | 15,9  | 20,6  | 17,1  | 13,6  |
| 90g Day., (MPa)             | 23,5  | 27,2  | 22,8  | 22,1  |
| 28g DBHA, g/cm <sup>3</sup> | 1,807 | 1,846 | 1,824 | 1,832 |
| Su/Çim.,%                   | 0,38  | 0,37  | 0,4   | 0,51  |

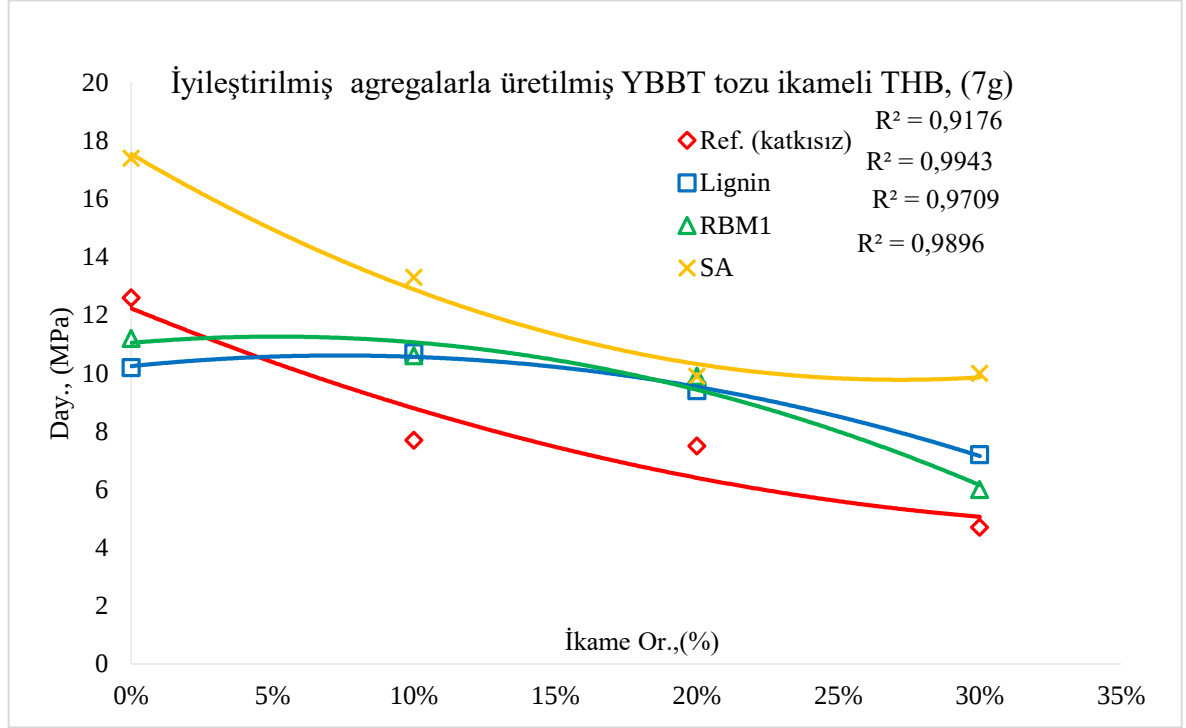
| RBM1 Katkılı Seri           |       |       |       |      |
|-----------------------------|-------|-------|-------|------|
| YBBT İkame Or., (%)         | 0%    | 10%   | 20%   | 30%  |
| 7g Day., (MPa)              | 11,2  | 10,6  | 9,9   | 6    |
| 28g Day., (MPa)             | 17,4  | 19,3  | 17    | 11,9 |
| 90g Day., (MPa)             | 26,4  | 26,2  | 24,5  | 20,3 |
| 28g DBHA, g/cm <sup>3</sup> | 1,893 | 1,892 | 1,883 | 1,86 |
| Su/Çim.,%                   | 0,38  | 0,39  | 0,39  | 45,6 |

| SA Katkılı Seri             |       |       |      |       |
|-----------------------------|-------|-------|------|-------|
| YBBT İkame Or., (%)         | 0%    | 10%   | 20%  | 30%   |
| 7g Day., (MPa)              | 17,4  | 13,3  | 9,9  | 10    |
| 28g Day., (MPa)             | 26,7  | 22,5  | 17,3 | 18,5  |
| 90g Day., (MPa)             | 34,7  | 34,3  | 26,7 | 27,4  |
| 28g DBHA, g/cm <sup>3</sup> | 1,908 | 1,912 | 1,88 | 1,903 |
| Su/Çim.,%                   | 0,31  | 0,32  | 0,39 | 0,33  |

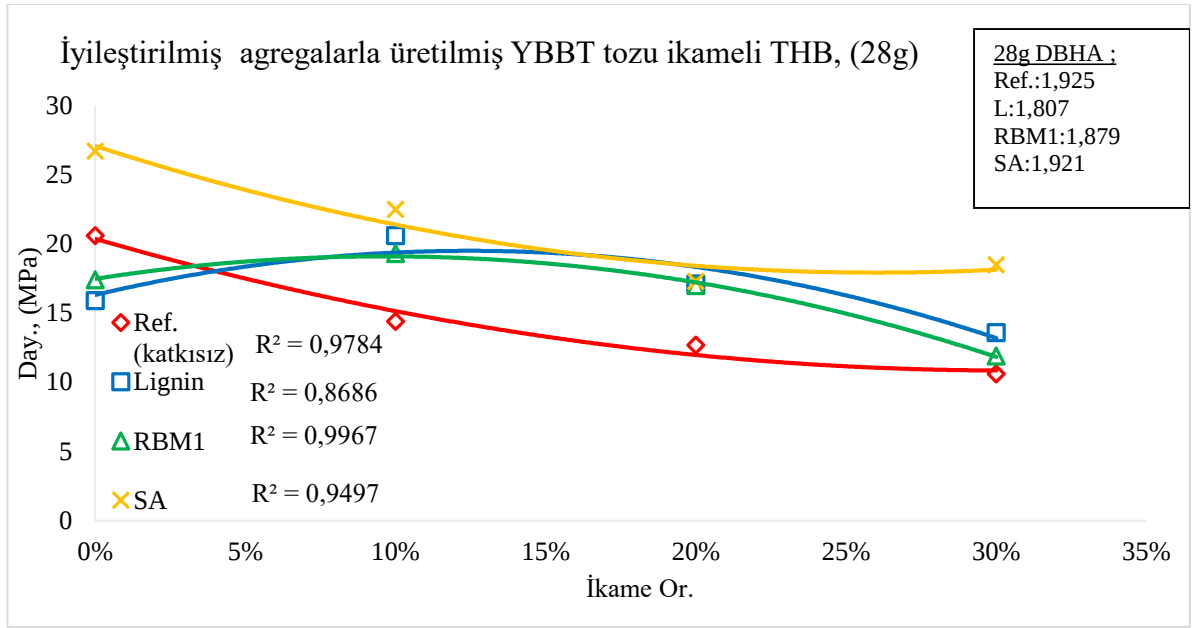
**3.5.1.1. 7, 28 ve 90 günlük dayanımlara katkıların etkisi**

Hedeflenen 30 MPa basınç dayanım değeri elde edebilmek amacı ile karışımlara akışkanlaştırıcı olarak lignin (%0,6), tekstil fabrikalarının atıklarından elde edilen RBM1(Amber CA-N, %0,04 oranında) ve SA katkısı kullanıldı. Şekil 82'de %0-30 YBBT agregası ikame edilerek üretilen yedi günlük THB'lere katkıların etkisi verilmektedir.



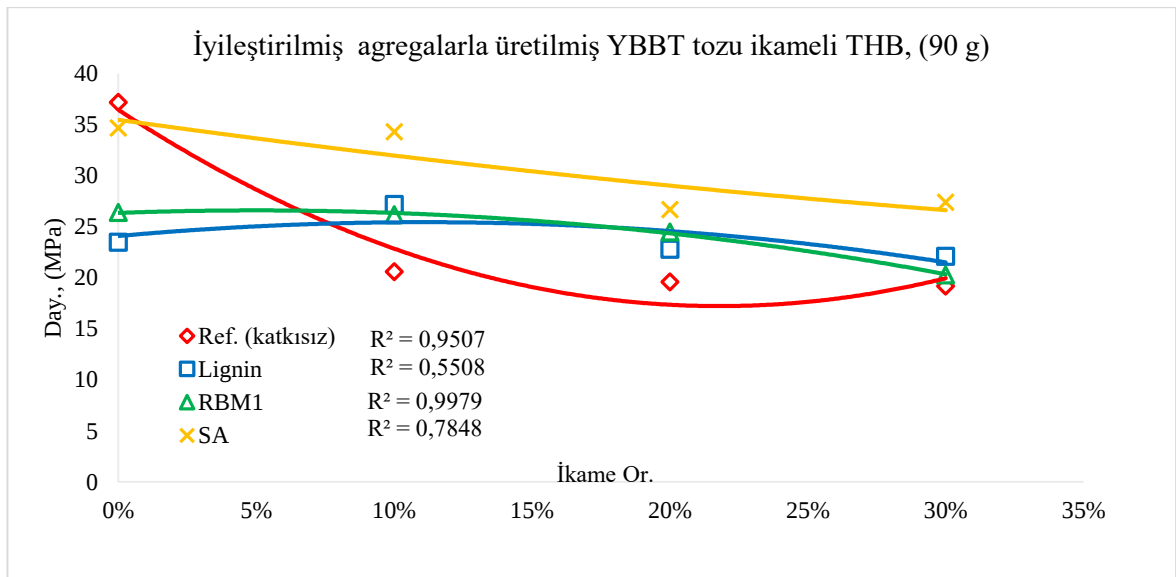
**Şekil 82:** % 0-30 YBBT Tozu İkame Edilerek Üretilen 7 Günlük THB'lere Ait Sonuçlar

Şekil 82'den görüldüğü gibi, 7 gün kür sonunda ikame oranının artması ile beklendiği gibi ilk dayanımların düşük seyrettiği izlenmektedir. YBBT tozu ikame oranı artmakla beklendiği gibi dayanımlarda %30'ara varan düşüşler görülmektedir. Bilindiği gibi katkıli çimentolar ile üretilen betonların hidrasyon ısıları ve buna bağlı olarak ilk dayanımları düşük olmaktadır (Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği Ar-Ge Enstitüsü, 2009). Buradaki beklenti ileri yaş dayanımlarında, kirece doymun suda kür edilen THB serilerinin, gelişmesi beklenen puzolanik aktiviteler ile yüksek dayanımların elde edilmesidir. Kullanılan akışkanlaştırıcıların hepsi yedi kür sonunda katkı kullanılmayan referans serisinden yüksek dayanım oluşmasına neden olmuş ve en yüksek dayanım SA katkıli seride meydana gelmiştir. Şekil 83'te %0-30 YBBT agregası ikame edilerek üretilen yirmi sekiz günlük THB'lere katkıların etkisi verilmektedir.



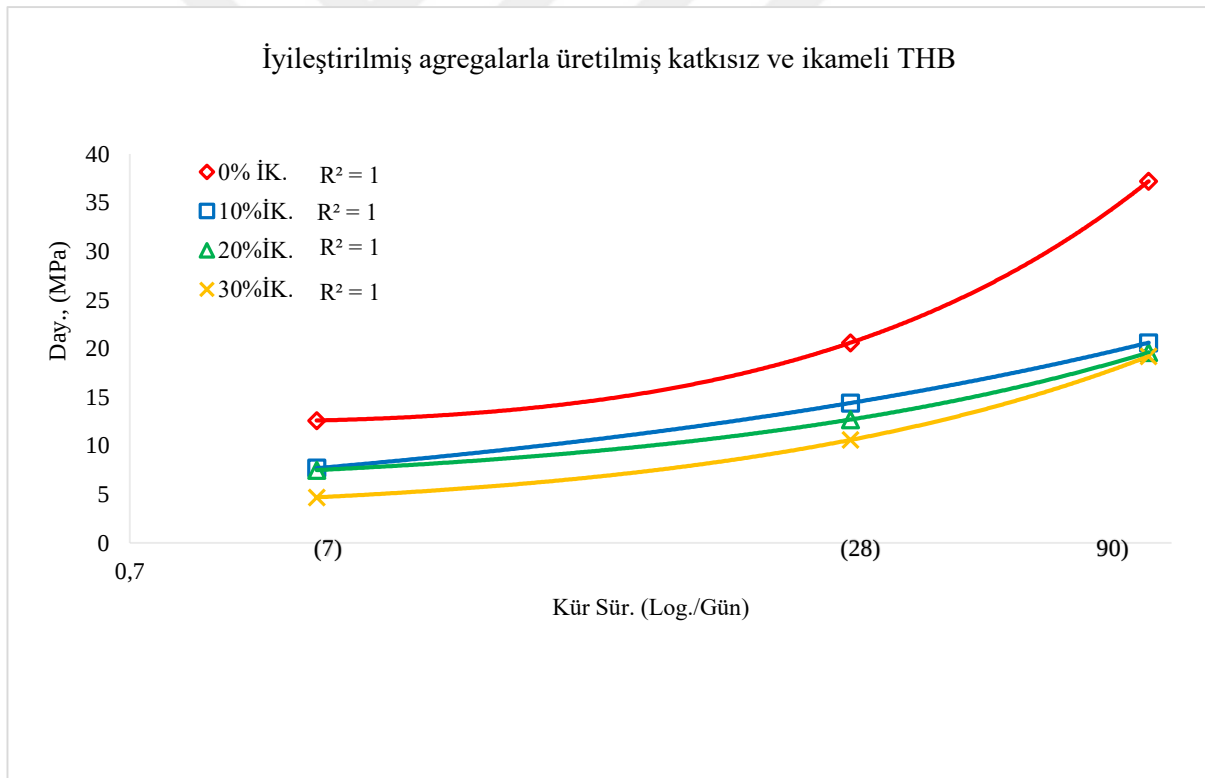
**Şekil 83:** 0-30 YBBT Tozu İkame Edilerek Üretilen 28 Günlük THB'lere Ait Sonuçlar

Şekilden 83'ten görüldüğü gibi 28 gün standart kür edilen numunelerden SA katkılı serilerin basınç dayanımları tüm ikame oranlarında katkısız, lignin ve RBM1 katkılı serilerden daha fazla dayanım oluşmasına neden olmuştur. Lignin katkılı seriler (%0 ikameli seri hariç), akışkanlaştırıcı özelliği sayesinde tüm ikame oranlarında katkısız serilerden daha fazla dayanım (%28-43 oranlarında) oluşmasına neden olmuştur. Ayrıca ligninin hava sürüklenme özelliği, ikame yapılmayan seride daha fazla etki göstermiş ve BHA değeri daha da azalmıştır. En yüksek dayanım SA katkılı ve ikame edilmeyen seride meydana gelmiştir. RBM1 ve lignin katkılı serilerde %10 YBBT tozu ikamesi ile 28 gün kür sonunda dayanımların artması dikkat çekmektedir. Şekil 84'te YBBT tozu ikame edilerek üretilen 90 günlük THB'lere ait sonuçlar verilmiştir.

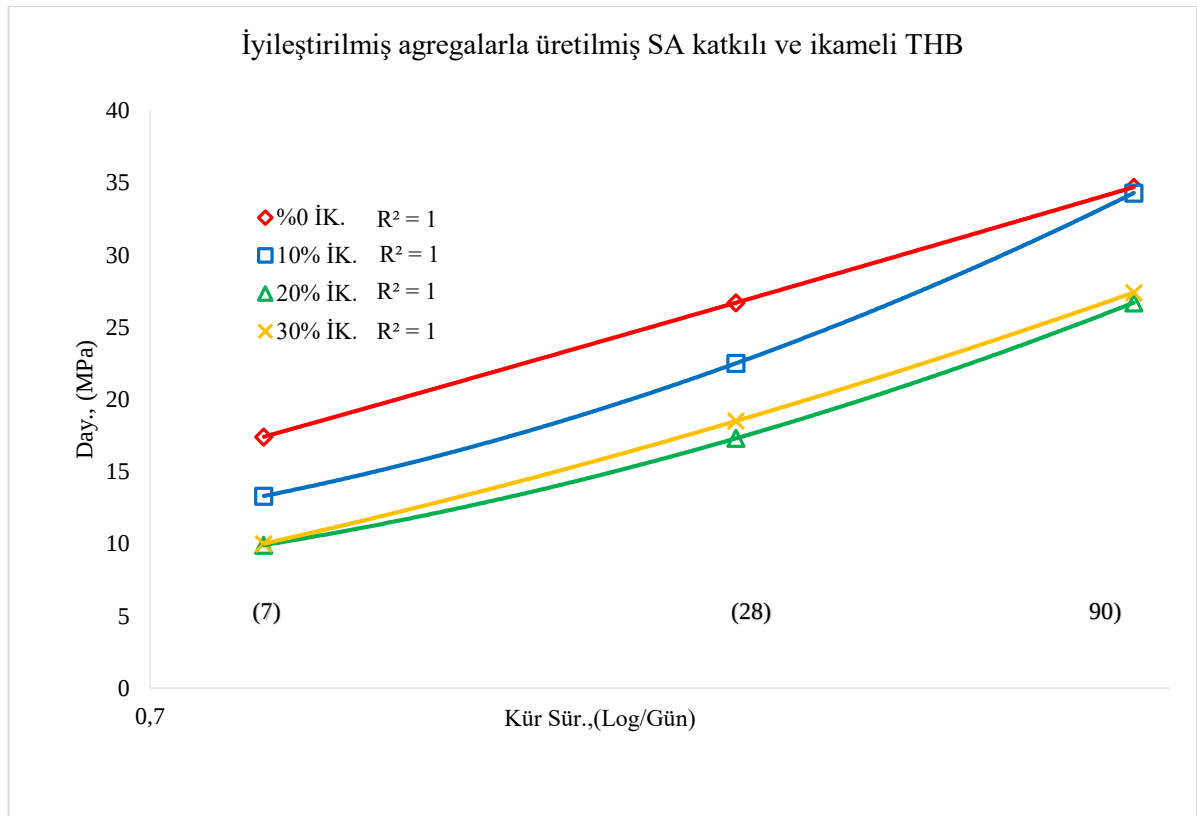


**Şekil 84:** % 0-30 YBBT Tozu İkame Edilerek Üretilen 90 Günlük THB'lere Ait Sonuçlar

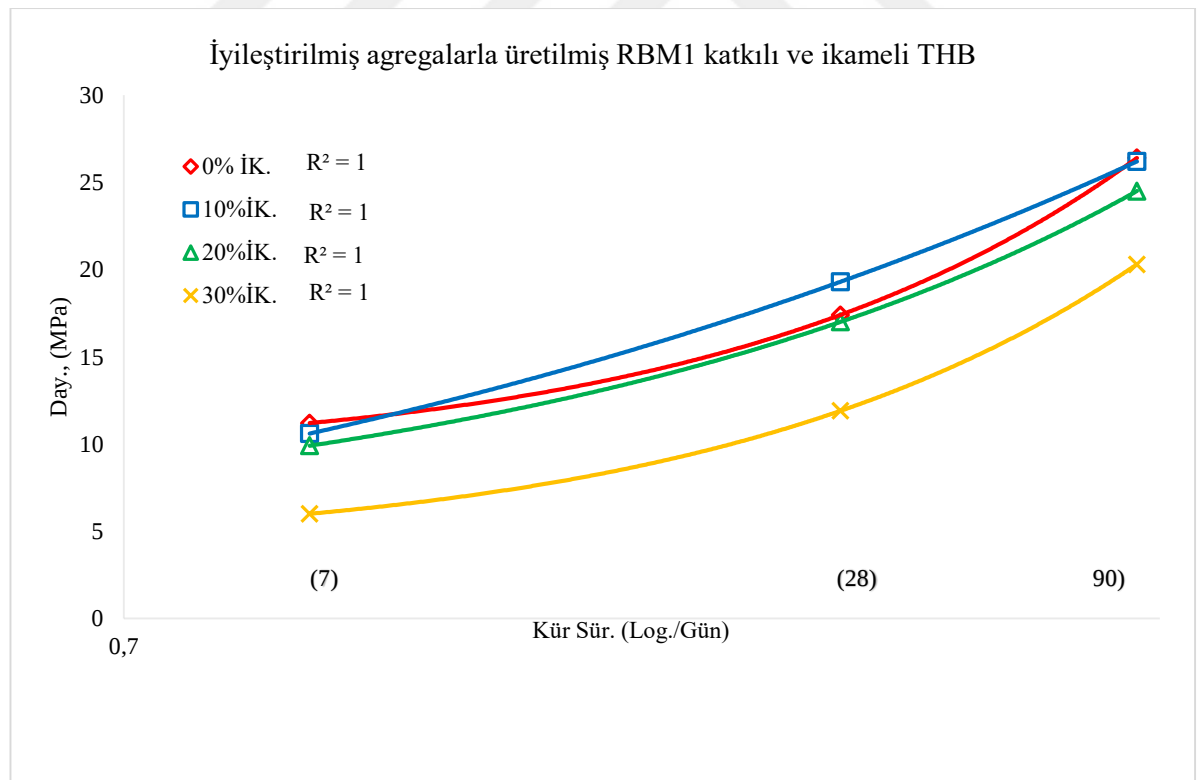
Şekil 84'ten, agregaların çözünerek içsel puzolanik aktivitelerinin ve ikame malzemesinin puzolanik aktivitesinin ileriki yaşlarda gelişmesi ile birlikte özellikle 90. gün basınç dayanımlarında farkın daha da azalarak hedeflenen en az 30 MPa basınç dayanım değerine ulaştığı görülmektedir (%0 ve %10). Önceki çalışmalarda da bu durumun gerçekleştiği görülmüştür. Burada ikame oranının %20 ve %30 artması ile dayanımlarda hissedilir azalmalar görülmektedir. En yüksek dayanım SA karışımlı serilerden elde edilmiştir. Özellikle %0 ve %10 ikame edilen serilerde basınç dayanım değerleri yaklaşık değerler oluşması %10 YBBT tozu ikamesinin dayanımları fazla etkilemediğini göstermektedir. Lignin ve RBM1 katkılı seriler tüm ikame oranlarında 90 gün sonunda kontrol betonundan sırası ile %32-26,7 oranlarında daha fazla dayanım artışına neden olmuştur (%10 ikame). Sonuç olarak 90 gün sonunda tamamlana puzolanik reaksiyonlar sonunda ortalama; ikamesiz seride %52, %10 ikameli seride %41, %20 ikameli seride %46 ve %30 ikameli seride ise %66 lara varan oranlarda dayanım artışı gerçekleşmiştir. Şekil 85-88'de THB üretiminde çimentoya YBBT ikame oranlarının 7, 28 ve 90 günlük değişimleri katkı çeşitlerine göre verilmiştir.



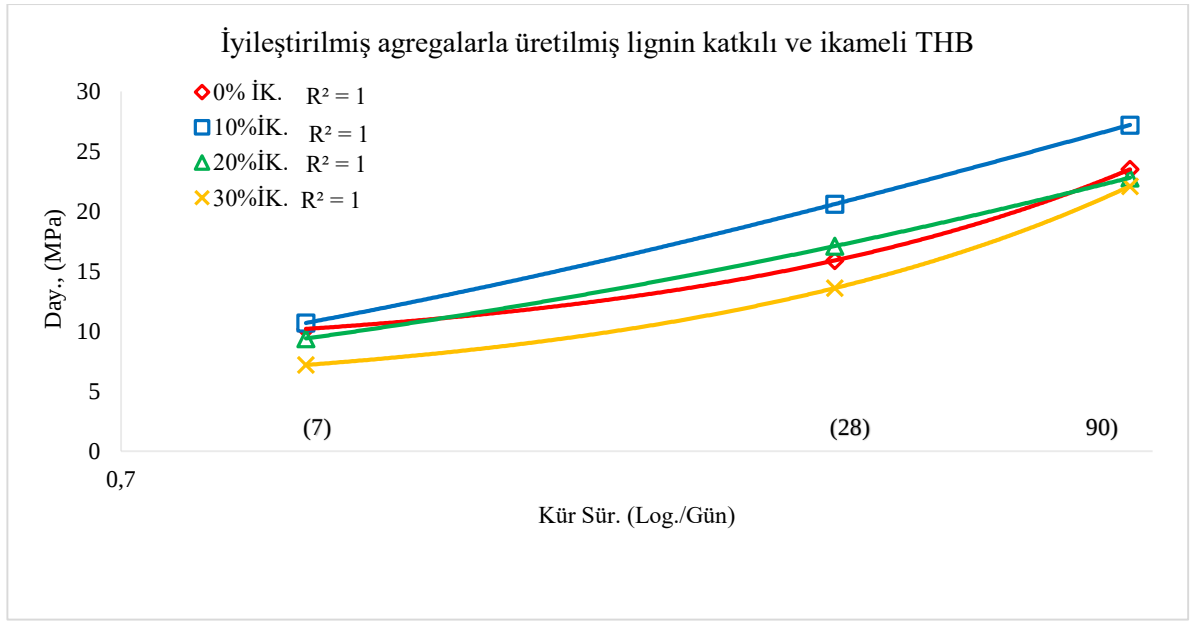
**Şekil 85:** İkame Oranının THB'lerin Dayanımlarına Etkisi (Katkısız)



**Şekil 86:** İkame Oranının THB'lerin Dayanımlarına Etkisi (SA Katkılı)



**Şekil 87:** İkame Oranının THB'lerin Dayanımlarına Etkisi (RBM1 Katkılı)



**Şekil 88:** İkame Oranının THB'lerin Dayanımlarına Etkisi (Lignin Katkılı)

Şekil 85-88'de kür süresi logaritmik eksenle gösterilmiştir. Pozolanik aktivitenin özellikle 14. günden sonra etkisini göstermesi ile THB'lerin 28 ile 90 günlük periyotlardaki dayanımlarındaki artış en fazla %10 ve %20 ikame edilen serilerde gerçekleşmiştir. Ayrıca katkı serilerde dayanım artışı 90. gün sonunda ikame edilmeyen seriden daha fazla dayanım oluşmasına neden olmaktadır. Buradan anlaşıldığı gibi ikame edilen YBBT tozunun pozolanik aktivite özelliği 28-90 gün aralığında hızlanmakta ve yaklaşık nihayi dayanımına 90. gün sonunda ulaşmaktadır. Akışkanlaştırıcı katkı kullanılarak üretilen THB'lere %20-30 YBBT tozu ikame edilmesi ile 90. gün sonunda ikamesiz seri ile benzer dayanım göstermesi, YBBT toz malzemesinin çimentoya %20-30 ikame edilebileceğini kanıtlamaktadır.

### 3.5.1.2. YBBT İkame oranlarının THB'ye etkisi

0-0,063 mm arası YBBT filler malzemesi çimentoya ağırlıkça; %0, %10, %20 ve %30 oranlarında ikame edildi. İkame oranı ile THB'lerin mekanik özelliklerindeki değişimin araştırılması ve bağlayıcı maliyetinin düşürülmesi amaçlandı. Şekilden 88'den görüldüğü gibi, 90. gün sonunda SA katkılı % 0 ve %10 ikame edilen THB'ler su kesme değerlerine bağlı olarak en yüksek dayanım oluşmasına ve hedeflene 30 MPa değerinin aşmasına neden olmuştur.

%10 YBBT ikame edilen serideki RBM ve lignin katkıları akışkanlaştırıcı etki göstererek kontrole göre sırası ile 23-27 MPa aralığında değerler oluşmasına neden olmuştur. Lignin, SA ve RBM katkı serilerde %10 YBBT tozu ikamesi ile dayanım 90. günde ikamesiz seriden daha fazla artırması dikkat çekmektedir. Buradan anlaşıldığı gibi pozolanik aktiviteler 90. günde çoğunlukla tamalanmaktadır. Tüm serilerde katkı THB'ler katkısız serilerden daha fazla dayanım oluşmasına neden olmuştur.

%20 YBBT ikame edilen serilerin dayanımları ortalama %15 düşüş göstermiştir. En fazla düşüş %22 ile SA katkılı seride en az düşüş %5 ile katkısız seride oluşmuştur. İkame edilmeyen serilere göre basınç dayanımı sırası ile %11,9 - 15,7 oranlarında azalmıştır. %20 ikameli SA katkılı serideki dayanım düşüşü ikamesiz seriye kıyasla % 35,2'dir. %20 ikame edilen serilerin dayanımlarının ortalaması 16 MPa iken ikame edilmeyen serilerinin dayanımlarının ortalaması 20,3 MPa'dır. Sonuç olarak, THB'lere %20 YBBT filler malzemesi ikame edilmesi ile THB dayanımlarının ikame edilmeyen seriye göre %21,2 azaldığı görülmektedir.

%30 YBBT ikame edilerek üretilen THB'lerde de 90. gün sonunda beklendiği gibi basınç dayanımlarında düşüş devam etmiştir. En fazla düşüş katkısız seride olumuş (%49) ve en az dayanım azalması lignin katkılı seride meydana gelmiştir (%6). SA katkılı seride dayanım %21 olurken RBM1 katkılı seride bu oran %23 olmuştur. Sonuçta 90 gün sonunda hedef dayanıma az farkla yaklaşmıştır. Tüm katkıları akışkanlaştırıcı etki göstererek betonların dayanımlarında kontrol betonuna göre daha fazla dayanım oluşmasına neden olmuştur. Nayır (2021) tez çalışmasında, 450 kg çimento dozajı, pomza perlit ve normal agregayı değişik oranlarda kullanarak THB üretti. %25 uçucu kül içeren karışımların 90 günlük dayanımlarının 25,1 MPa ve kuru BHA değerinin 1,609 g/cm<sup>3</sup> olarak bulmuştur.

Sonuç olarak, üretilen THB'lere %10 YBBT ikame edilmesi ile dayanımlarda fark edilebilir bir azalma oluşmamıştır. Bu sonuca göre 450 kg/m<sup>3</sup> çimento ile elde edilen dayanım, 405 kg/m<sup>3</sup> çimento ( yaklaşık 50 kg/m<sup>3</sup> tasarruf ) ile elde edilebilmektedir. Çimentoya %20 ve %30 YBBT filler malzemesi ikame edilmesi ile 90. gün sonunda THB'lerin basınç dayanımlarında %4-22 arasında değişen değerlerde kayıplara neden olmaktadır. Amerikan standartları taşıyıcı hafif beton için 17,2 MPa değerini şart koşturmaktadır. Bu standart referans alındığında, çimentoya %30 YBBT tozu ikame edilmesi ile üretilen THB'lerin 90. gün kür periyodu sonunda istenen dayanım şartları sağlanmakta ve YBBT toz malzemesinin çimentoya ikame edilerek kullanılabileceği anlaşılmaktadır.

### **3.5.2. TOHB Üretiminde BBT'nin Çimento İkame Malzemesi Olarak Kullanılması**

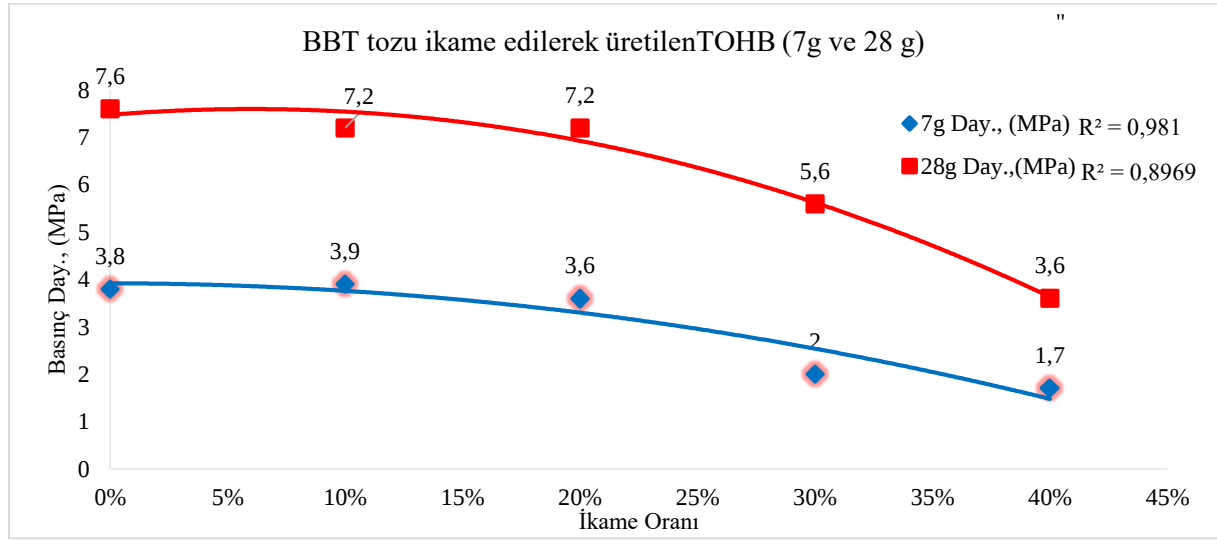
TOHB üretiminde hafif olması nedeniyle BBT agregası kullanıldı. Çimento ikame malzemesi olarak kullanılan 0-63 mikron toz BBT, karışım serilerine; % 0, %10, %20, % 30 ve %40 oranlarında ikame edildi. TS EN 771-3'e uygun olarak üretilen 10×10×10 cm ebatlarında dolu gövdeli TOHB blokları Yüksel Kaya Makine firmasına ait taze beton sarsma cihazında önce sarsıldı, daha Yüksel Kaya Makine firmasına ait PROFİ 6X press cihazı ile 12 MPa basınç uygulanarak sıkıştırıldı. Kalıptan çıkarılan numuneler 7 ve 28 gün nemli ortamda

bekletildikten sonra basınç dayanım testi gerçekleştirildi. Tablo 36’da TOHB üretiminde gerçekleştirilen deneyler sonunda elde edilen değerler verilmiştir.

**Tablo 35:** TOHB Üretiminde BBT’nin Çimento İkame Malzemesi Olarak Kullanılması

| İkame Or.                      | 0%, (Ref.) | 10%   | 20%   | 30%   | 40%   |
|--------------------------------|------------|-------|-------|-------|-------|
| 7g Day., (MPa)                 | 3,8        | 3,9   | 3,6   | 2,0   | 1,7   |
| 7g KBHA, (g/cm <sup>3</sup> )  | 1,63       | 1,57  | 1,594 | 1,448 | 1,51  |
| 28g Day.,(MPa)                 | 7,6        | 7,2   | 7,2   | 5,6   | 3,6   |
| 28g DBHA, (g/cm <sup>3</sup> ) | 1,815      | 1,806 | 1,815 | 1,784 | 1,751 |

Şekil 89’da, çimentoya %0-40 BBT filler malzemesi ikame yapılarak üretilen TOHB serilerinden elde edilen sonuçlar verilmiştir.



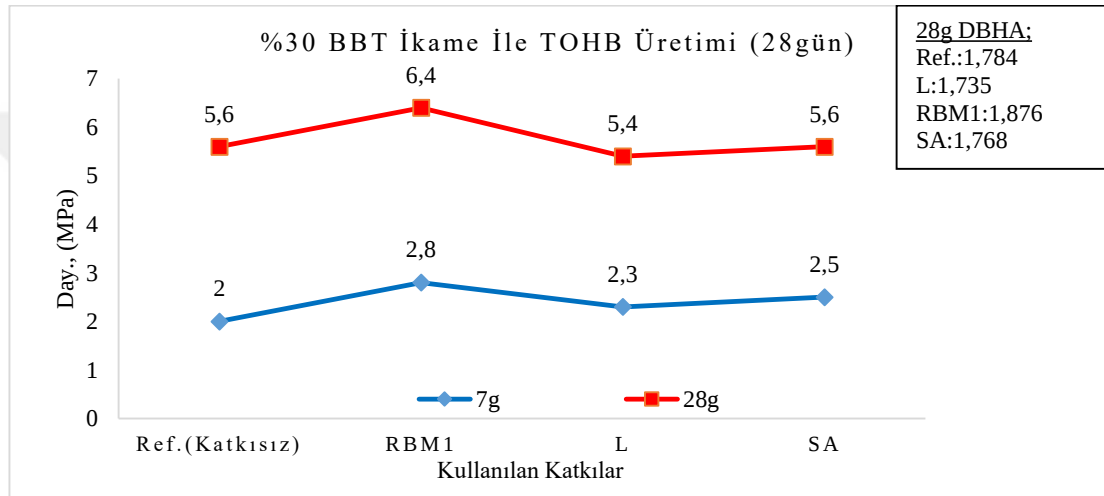
**Şekil 89:** BBT İkamesi ile Üretilen TOHB’lerin Basınç Dayanımlarındaki Değişim

Şekil 89’dan görüldüğü gibi, çimentoya BBT ikame oranının artması ile beklendiği gibi üretilen TOHB serilerinin basınç dayanımlarında genel olarak bir azalma görülmektedir. Ancak pozolanik aktivite özelliği bulunan BBT filler ikame malzemesinin 14 günden sonra devreye girmesi ile özellikle 28 günlük basınç dayanımlarında % 20 ikame oranına kadar belirgin bir düşüş görülmemektedir. Bu durum BBT filler malzemesinin pozolanik aktivitesinin, HB’lerin ileriki yaş dayanımlarında artışa neden olduğu tezini desteklemektedir. BBT toz malzemesinin ikamesi edilmesi ile pozolanik aktivite 14. günden sonra devreye girmekte ve özellikle 28. gün sonunda kırılan numunelerin hedeflenen en az 5 MPa basınç dayanım değerini (%40 ikame oranı hariç) sağladığı görülmektedir. Karışıma %40 BBT ikame edilmesi ile çimento miktarı ile birlikte ortamdaki  $\text{Ca(OH)}_2$  konsantrasyonu azalmaktadır. Ortamda yetersiz kireç bulunması

nedeniyle BBT’de bulunan SiO<sub>2</sub> yeterince bağlanamamıştır. Sonuç olarak yeterli CSH jeli oluşmadığı için basınç dayanımı düşmüştür.

### 3.5.3. %30 YBBT İkamesi İle Üretilen TOHB'lere Katkıların Etkisi

Katkıların TOHB’lerin basınç dayanımlarındaki değişimin araştırılması amacıyla çimentoya %30 BBT ikame edilerek TOHB serileri üretildi. TOHB serilerine önce sarsma ve daha sonra 12 MPa press uygulanarak sıkıştırma yapıldı. Akışkanlaştırıcı olarak; RBM1, lignin, SA katkıları kullanıldı. 7 ve 28 gün nemli ortamda kür edilen numunelere basınç dayanım testi uygulandı ve elde edilen sonuçlar Şekil 90’da gösterilmektedir.



**Şekil 90:** RBM1, SA ve Ligninin TOHB Üretimine Etkisi

Şekil 85’ten görüldüğü gibi 7 ve 28 günlük kütleme sonunda, atıklardan elde edilerek kullanılan akışkanlaştırıcı katkıları (lignin ve RBM1) ile üretilen TOHB karışımları, referans (katkısız) seriden %25 daha fazla basınç dayanımının elde edilmesine neden olmuştur. Atıklardan elde edilen lignin ve RBM1 katkılarının basınç dayanımlarında oluşturduğu olumlu etki, THB serilerinde oluşturduğu olumlu etki ile örtüşmektedir.

### 3.6. MALİYET ANALİZİ

Bu bölümde; tez kapsamında THB ve TOHB üretiminde kullanılan atıkların mevcut rezervlerinin yanı sıra kullanıma uygun hale getirilebilmesi ve son ürün elde edilinceye kadar gerçekleşen süreçlerdeki girdi maliyetleri detaylı araştırıldı. Ürünlerin maliyet analizi iki aşamalı olarak değerlendirildi. İlk aşamada BBT agregası ile üretilen 10×10×10 cm ebatlarındaki küp TOHB bloklar, piyasadaki perlit/pomza kullanılanlar ile üretilen hafif beton bloklar (BİMS) ile maliyet, mukavemet ve işlevsellik açısından karşılaştırıldı. İkinci aşamada

ise YBBT agregası ile üretilen 1 m<sup>3</sup> LC25/28 THB, piyasada halen kullanılmakta olan normal agrega ile üretilmiş C25/30 betonu ile maliyet ve işlevsellik açısından değerlendirildi.

#### **a. BBT'nin toplam rezervi ve yıllık oluşan atık miktarı**

Bayburt beyaz taşı (BBT) atıklarının hafif beton blok üretiminde kullanılması hem çevresel sürdürülebilirlik hem de maliyet açısından birçok avantaja sahiptir. Bayburt ilinin muhtelif taş ocaklarında çıkarıldıktan sonra işletmelerde işlenerek son ürün elde edilinceye kadar geçen süreçlerde %50'lerde BBT atıkları oluşmaktadır. Atıklar genellikle ocaklarda moloz halinde, işletmelerde ise toz veya daha küçük hacimli taşlardan oluşmaktadır. Araştırmalar, Bayburt ili ve çevresinde BBT'nin tahmini blok verimine göre görünür rezervi yaklaşık 2,5 milyon ton; muhtemel rezervi 650 bin ton ve mümkün rezervi ise 600 bin ton olarak hesaplanmıştır (Yağcıoğlu, 2019). Taşın rezervi, tahmini olarak blok verimi ile çarpıldığında 453.382 ton civarındadır ve bu rakam işletilebilir rezervini göstermektedir. BT'nin görünür rezervi, hesaplamalara göre yılda 15,000 ton üretim yapan 10 işletmeye 20 yıl yetecek potansiyelin olduğunu göstermiştir (Kaçar, 2014). 2005 yılında MTA tarafından Bayburt ilinde yapılan etütlerde; Toptepe, Sırataşlar, Gevenli, Konakdağ ve Gümüşdamla sahalarında toplam 2.535.700 ton görünür rezerv, 643070 ton muhtemel rezerv ve 599 200 ton mümkün rezerv hesaplanmıştır (MTA, 2005). Tablo 38'de Bayburt Taşının rezerv miktarları verilmiştir.

**Tablo 36:** Bayburt Taşının Rezerv Miktarları (MTA, 2005)

|            | Görünür Rez. (ton) | Muhtemel Rez. (ton) | Mümkün Rez. (ton) |
|------------|--------------------|---------------------|-------------------|
| BT Rezervi | 2,535.700          | 643070              | 599200            |
| %30 atık   | 760.710            | 192921              | 179760            |
| %50 atık   | 1.267.850          | 321535              | 299600            |

#### **b. Atık BBT agregasının maliyeti ve sağladığı faydalar**

Atık taşlar genellikle ücretsiz veya düşük maliyetli olarak temin edilebilir. Atık taşların beton üretimine uygun hale getirilmesi için nakliye, kırma ve öğütmeye ek olarak eleme gibi işlemler de yapılmaktadır. Bu işlemlerin maliyeti; işçilik, nakliye ve enerji tüketimine bağlı olarak değişmektedir.

Atık taşların değerlendirilmesi ile tarımsal çevrenin ve doğal ekolojinin zarar görmesinin önüne geçilecektir. Ayrıca doğal kaynakların korunmasının yanında, üretilen hafif betonlarla yapıların ölü yükleri azaltılmakta ve depreme daha dayanıklı yapılar inşaa

edilebilecektir. Atık agregalardan elde edilen filler malzemelerin çimentoya ikame yapılması ile enerji tasarrunun yanı sıra CO<sub>2</sub> salınımı da azalmış olacaktır. Bu durum maliyetleri düşürerek ülke ekonomisine ciddi fayda sağlayacaktır.

#### **c. Kağıt fabrikalarında oluşan atık siyah likör , (Lignin)**

Atık sudaki ana kirletici, lignin ve türevlerini içeren organik maddelerdir. Soda geri kazanım tesisi olan kağıt hamuru ve kağıt endüstrisinde, 1 kg kağıt üretimi için ortalama 350 L atık su ortama deşarj edilir ve 1 kg ağartılmış kağıt başına 40-50 gr. lignin üretilir (Bajpai ve Bajpai, 1994). Siyah likörün yaklaşık %47'sini lignin oluşturur (Kim vd., 2019). Ağartılmış kağıt üreten kraft fabrikasının, kemik kurusu bazda bir ton hamur başına yaklaşık 1,7-1,8 ton siyah likör ürettiği bildirilmektedir (IEA Bioenergy, 2007). OYKA kraft kâğıt fabrikasının yıllık kağıt üretim kapasitesi 100.000 ton'dur. Bu kapasiteye sahip bir tesis yılda ortalama 175000 ton siyah likör üretir. Bu bilgilere dayanarak, bir fabrikadan yaklaşık olarak 82250 ton atık katı lignin elde edilmektedir. 1m<sup>3</sup> C25/30 betonuna yaklaşık 2,7 kg katı lignin eklenmektedir. Türkiye'de yıllık ortalama 105 milyon metreküp beton üretimi gerçekleştiği (Türkiye Hazır Beton Birliği [THBB], 2024) belirtilmektedir. 2019 yılında toplam 448,470 ton beton katkısı üretilmiştir. Üretilen toplam miktarın % 80,0'ini (358776 ton) beton akışkanlaştırıcıları oluşturmaktadır (Cemen Türk, 2020). Buradan görüldüğü gibi sadece bir fabrikadan üretilen yıllık ortalama 82250 ton atık lignin, toplam ihtiyacın yaklaşık %20'sini karşılamaktadır. (Katkı Üreticileri Birliği, 2022) raporuna göre, 1 m<sup>3</sup> C25/30 betonu için kullanılan akışkanlaştırıcının maliyeti 1,14 Amerikan Doları'dır. Sonuç olarak kağıt fabrikaları atıklarından elde edilen ligninin, normal ve hafif beton üretiminde akışkanlaştırıcı ve hava sürükleyici katkı maddesi olarak kullanılması, hem ülkenin ekonomisine hem de doğal çevrenin bozulmasının önlenmesine büyük fayda sağlamaktadır.

#### **d. Tekstil fabrikalarında oluşan yıllık atık RBM miktarı**

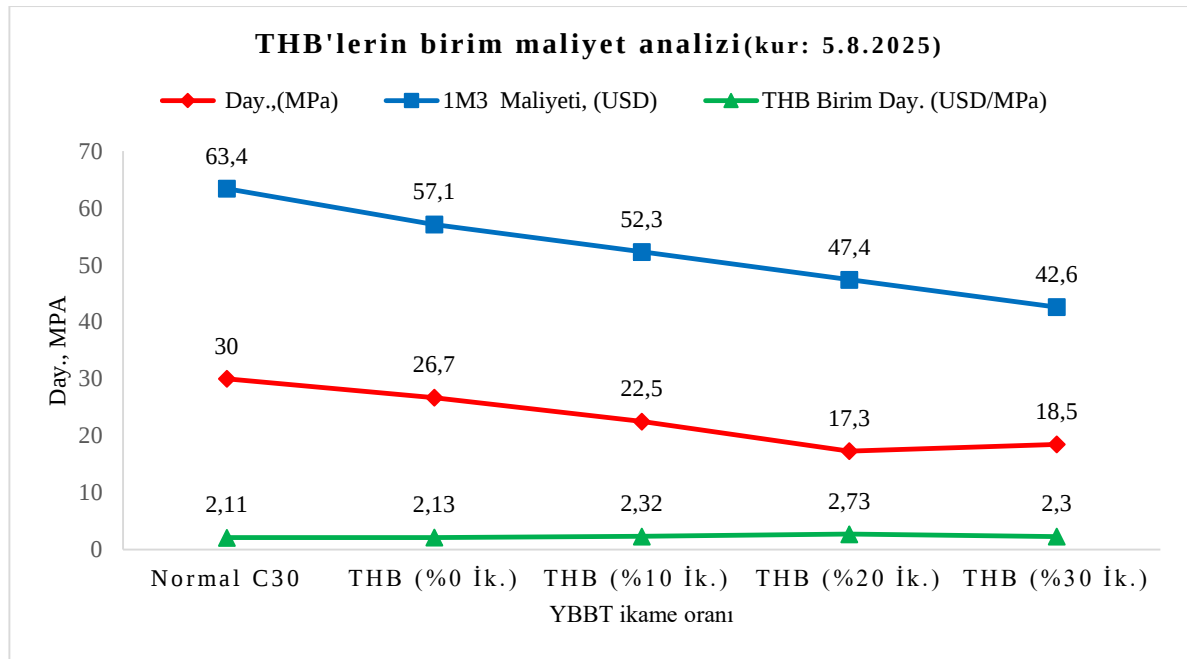
2006 verilerine göre yıllık oluşan atık 16000 ton'dur (Gül & Yıldız, 2020). RBM'ler katı olarak ve çimento ağırlığının %0,04'ü oranında kullanılabildiği yapılan ön çalışmalarda tespit edilmiştir. Bu doğrultuda, 1 metre küp C25/30 betonu için (370 kg bağlayıcı) 148 gr RBM gerekmektedir. Türkiye'de yıllık beton tüketimi 2023 verilerine göre yaklaşık 105 (THBB, 2024) milyon m<sup>3</sup>tür. Yıllık üretilen beton için yaklaşık 14700 ton RBM gerekeceği ön görülmektedir. Sonuç olarak, tekstil atıksularından elde edilen RBM'lerin sadece beton akışkanlaştırıcı katkı maddesi olarak kullanılması ile büyük bir bölümünün çevreye zararı olmadan beton içinde güvenli bir şekilde immobilize edilebilecektir.

### 3.6.1. Üretilen THB'lerin Maliyet Analizi

Bu bölümde, normal kireçtaşı agregası ile üretilmiş 1m<sup>3</sup> C25/30 betonu ile hafif YBBT agregası kullanılarak üretilen C25/30 (LC25/28) betonunun karşılaştırılması maliyet ve kullanım özellikleri açısından değerlendirildi. Tablo 39'da normal kireçtaşı agregası ile üretilen 1 m<sup>3</sup> C25/30 betonunun güncel (Ağustos, 2025) satış fiyatı, sarf edilen malzeme miktarı ve kullanım bilgileri ile zeolitik yapıda bulunan hafif YBBT agregası kullanılarak üretilen C25/30 (LC25/28) betonunun maliyeti ve kullanım olanakları gösterilmiştir.

**Tablo 37:** 1m<sup>3</sup> THB Üretiminin Maliyet Hesabı

|                                           | Normal Beton (C25/30) |                   | YBBT Agr. Beton (LC25/28) |                    |
|-------------------------------------------|-----------------------|-------------------|---------------------------|--------------------|
|                                           | Kg/m <sup>3</sup>     | TL/m <sup>3</sup> | Kg/m <sup>3</sup>         | TL/m <sup>3</sup>  |
| Çimento                                   | 370                   | 1480              | 450                       | 1980               |
| Agrega                                    | 1850                  | 700               | 1207(kırma vb.)           | 343                |
| Su                                        | 185                   | 2                 | 225                       | 2                  |
| SA                                        | 3,7(%1)               | 400               | Lignin/RBM(Atık)          | 0                  |
| Girdi Maliyet Topl., (Kg/m <sup>3</sup> ) | 2582TL/m <sup>3</sup> |                   | 2325TL/m <sup>3</sup>     |                    |
| İkamesiz Maliyet Farkı                    |                       |                   | 2325 TL/m <sup>3</sup>    | (%9,9 daha ucuz)   |
| %10 İkameli Maliyet Farkı                 |                       |                   | 2127 TL/m <sup>3</sup>    | (%17,6 daha ucuz)  |
| %20 İkameli Maliyet Farkı                 |                       |                   | 1929 TL/m <sup>3</sup>    | (%25,3 daha ucuz)  |
| %30 İkameli Maliyet Farkı                 |                       |                   | 1731 TL/m <sup>3</sup>    | (% 32,9 daha ucuz) |
| DBHA, (Kg/m <sup>3</sup> )                | 2500                  |                   | Ort. 1850                 | %26 daha hafif     |
| KBHA, (Kg/m <sup>3</sup> )                | 2400                  |                   | Ort. 1600                 | %33,3 daha hafif   |



**Şekil 91:** Normal ve THB'lere Ait Birim Maliyet

Şekilde 91'de normal beton üretiminin 1 MPa dayanımı için 2,28 USD maliyet gereklidir. %0-30 ikame oranlarında 1 MPa dayanım için gereken maliyet ikamesiz seri ile yaklaşık aynı USD değerlerindedir. Bu durum, THB'deki ikame oranının artması ile dayanımın düşmesine rağmen maliyetin de benzer oranda azalmasına bağlanmaktadır. Özellikle %0 ve %30 YBBT tozu ikame oranlarında THB'deki dayanımlarda gerçekleşen artışlar ile birim maliyetin de düştüğü görülmektedir.

### **1M<sup>3</sup> Betonun %30 hafiflemesinin deprem etkisine ve yapı maliyetine avantajı:**

Maliyet etkisi: % 30 hafifleyen yapı, 1m<sup>3</sup> betonda 34 kg daha az donatı gerektirir. Tüm betonarme eleman maliyetleri (beton, kalıp, işçilik vb)%30 daha düşük olacağından yapının toplam maliyeti yaklaşık %20 azalacaktır. Nayır (2021) yaptığı tez çalışmasında, pomza ve perlit agregası içeren mineral katkılı THB ile normal ağırlıklı betonu enerji performansı açısından değerlendirdi. Sonuç olarak THB ile üretilen konutların, normal ağırlıklı betona kıyasla yıllık %23 ila %30 oranında enerji tasarrufu sağladığını tespit etmiştir. Böylece ülkenin öz kaynaklarının korunmasının yanında aynı zamanda atıkların bertaraf edilmesi ile doğal çevre de korunmuş olacaktır.

Deprem etkisi: Toplam Eşdeğer Deprem Yükünün Belirlenmesi [  $V_t = W \cdot A(T_1) / R_a(T_1)$  ] hesabında, binanın toplam yükünün ( $w = g + n \cdot q$ ), zati ( $g$ ) ve hareketli yüklerin ( $n \cdot q$ ) toplamından oluştuğu görülmektedir. Binaya gelecek deprem yükü ( $V_t$ )  $W$  ile doğru orantılıdır. Binanın zati yükünün ( $g$ ) %30 azalması, depremin binaya aynı oranda daha az etki etmesi anlamına gelmektedir.

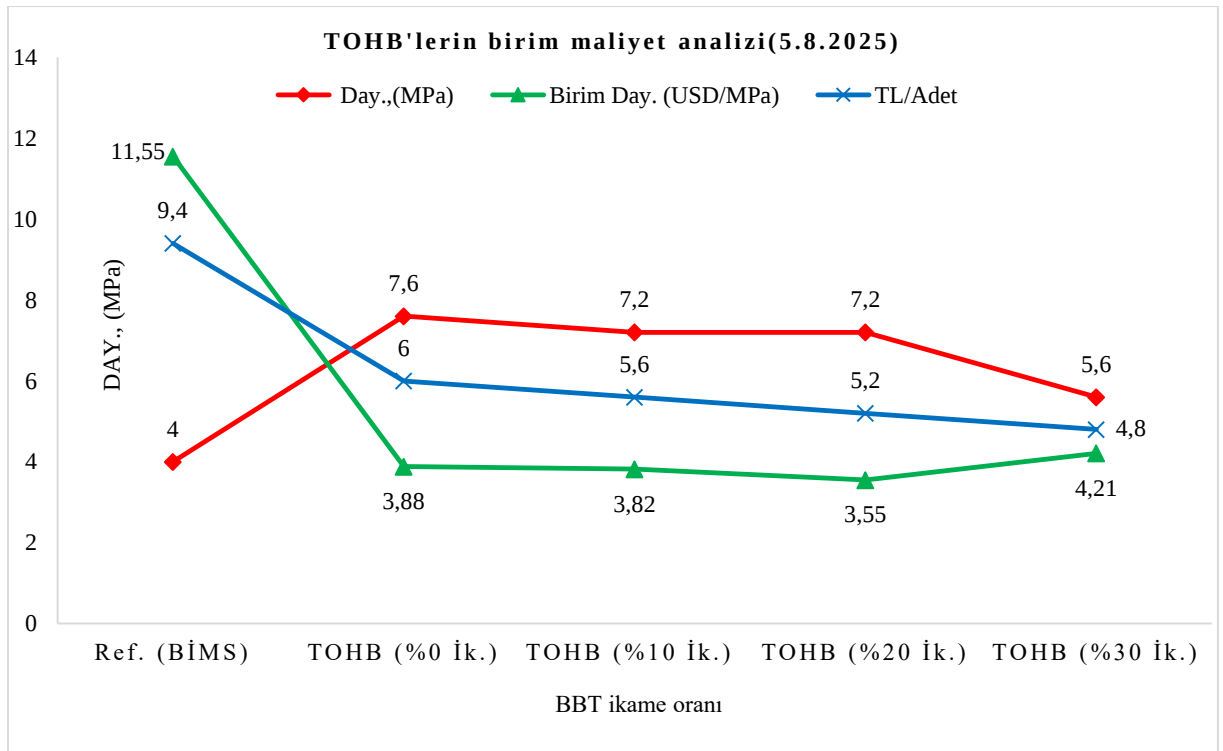
### 3.6.2. TOHB'lerin Maliyet Analizi

28 günlük hedef basınç dayanımı en az 5MPa olacak şekilde, BBT agregaları kullanılarak üretilen TOHB serileri, piyasada pomza ve perlit ile üretilen hafif beton bloklarla (BİMS briket) maliyet ve mukavemet özellikleri açısından karşılaştırıldı. TOHB blok üretim maliyeti; agrega, çimento, enerji, ekipman giderleri ve işçilik maliyet kalemlerinden oluşmaktadır. Tablo 38’de BBT agregası ile üretilen blok gövdeli TOHB ile piyasadaki perlit ve pomza ile üretilen hafif beton bloklar birim fiyatı olarak karşılaştırılmıştır.

**Tablo 38: TOHB Üretiminin Maliyet Analizi**

| Maliyet                   | Pomza(Bims)               | Perlit (Biriket)     | BBT ile TOHB ÜRETİMİ (M <sup>3</sup> ) (8.5.2025;1kwh=3 TL)       |                          |                          |                             |
|---------------------------|---------------------------|----------------------|-------------------------------------------------------------------|--------------------------|--------------------------|-----------------------------|
| Kalemi                    | (TL/m <sup>3</sup> )      | (TL/m <sup>3</sup> ) |                                                                   |                          |                          |                             |
| Agrega                    |                           |                      | Kırma                                                             |                          |                          |                             |
| (Kırma, Öğüt,             |                           |                      | (1m <sup>3</sup> )                                                | Öğütme(1m <sup>3</sup> ) | Eleme (1m <sup>3</sup> ) |                             |
| Elem)(TL/m <sup>3</sup> ) | 583                       | 583                  | (2,2 kw/h)                                                        | (3 kw/h)                 | (2 kw/h)                 | TOPLAM (TL)                 |
|                           |                           |                      |                                                                   |                          |                          | Σ                           |
|                           |                           |                      | 5 saat/m <sup>3</sup>                                             | 10 saat/m <sup>3</sup>   |                          | =81kwh/m <sup>3</sup> ×3TL/ |
| Enerji                    |                           |                      | =11kwh/                                                           | = 30kwh/                 | 20 saat/m <sup>3</sup> = | kwh                         |
| Maliyeti                  |                           |                      | m <sup>3</sup>                                                    | m <sup>3</sup>           | 40 kwh/m <sup>3</sup>    | 243TL/m <sup>3</sup>        |
|                           | -                         | -                    |                                                                   |                          |                          |                             |
| Atık ve Nakli.            | -                         | -                    |                                                                   | 100TL/m <sup>3</sup>     |                          | 100TL/m <sup>3</sup>        |
| (TL/m <sup>3</sup> )      |                           |                      |                                                                   |                          |                          |                             |
|                           | 1200                      | 1200 (300Kg/         |                                                                   |                          |                          |                             |
| Çimento                   | (300 Kg/ m <sup>3</sup> ) | m <sup>3</sup> )     |                                                                   | 200 Kg/m <sup>3</sup>    |                          | 800TL/m <sup>3</sup>        |
|                           |                           |                      |                                                                   |                          |                          |                             |
| Su                        | 1,5                       | 1,5                  |                                                                   | 100 Kg/m <sup>3</sup>    |                          | 1 Kg/m <sup>3</sup>         |
|                           |                           |                      |                                                                   |                          |                          |                             |
| Ek gider (%5)             | 90                        | 90                   |                                                                   | 57 TL/m <sup>3</sup>     |                          | 57TL/m <sup>3</sup>         |
|                           |                           |                      |                                                                   |                          |                          |                             |
| Dayanım(28g)              | 3-5MPa                    | 8-10MPa              |                                                                   | 7,2 MPa                  |                          |                             |
| Toplam Girdi              |                           |                      |                                                                   |                          |                          |                             |
| Maliyeti                  | 1875                      | 1875                 |                                                                   |                          |                          | 1201TL/m <sup>3</sup>       |
| Adet/m <sup>3</sup>       | 200                       | 150                  |                                                                   |                          | 200Adet/m <sup>3</sup>   |                             |
|                           |                           |                      |                                                                   |                          |                          |                             |
| Birim Adet                |                           |                      |                                                                   |                          |                          |                             |
| Maliyeti                  | 9,4TL/AD                  | 12,5TL/AD            | Birim Maliy.= [1200TL/m <sup>3</sup> ]/[200Adet /m <sup>3</sup> ] |                          |                          | 6 TL/AD                     |
| İkamenin Maliyete Etkisi  |                           |                      |                                                                   |                          |                          |                             |
|                           |                           |                      | TOHB                                                              |                          | THB                      |                             |
| Referans                  | 9,4 TL/AD (Pomza, BİMS)   |                      | 2852 TL/m <sup>3</sup> (Normal Beton, C25/30)                     |                          |                          |                             |
| İkamesiz                  | 6 TL/AD (%)36,1 daha ucuz |                      | 2325 TL/m <sup>3</sup> (%)17,7 daha ucuz                          |                          |                          |                             |
| %10 İkameli Maliyet       | %40,4daha ucuz            |                      | 5,6 TL/AD                                                         | %17,6 daha ucuz          |                          |                             |
| (1121₺/m <sup>3</sup> )   |                           |                      |                                                                   | 2127 TL/m <sup>3</sup>   |                          |                             |
| %20 İkameli Maliyet       | %44,6daha ucuz            |                      | 5,2 TL/AD                                                         | %25,3 daha ucuz          |                          |                             |
| (1041₺/m <sup>3</sup> )   |                           |                      |                                                                   | 1929 TL/m <sup>3</sup>   |                          |                             |
| %30 İkameli Maliyet       | %48,9 daha ucuz           |                      | 4,8 TL/AD                                                         | %32,9 daha ucuz          |                          |                             |
| (961₺/m <sup>3</sup> )    |                           |                      |                                                                   | 1731 TL/m <sup>3</sup>   |                          |                             |

Şekil 91’de üretilen TOHB’lere ait birim maliyetler USD/MPa olarak verilmiştir.



**Şekil 92:** TOHB'lere Ait Birim Maliyet Analizi

Şekil 92'den görüldüğü gibi, BBT tozu ikamesi ile 28 günlük dayanımlarda artışlar meydana gelmiştir. Girdi maliyetlerindeki azalmaya bağlı olarak özellikle  $m^3$  olarak üretimin 1 MPa dayanımı, 11,55 USD'den 3,8 USD seviyelerine inmektedir. Ayrıca üretilen TOHB'lerin maliyetleri TL/adet olarak referans BİMS maliyetinden (9,4 TL/Adet) %50 lere varan oranda azalarak 5-6 TL/Adet seviyelerine indiği görülmektedir. Sonuç olarak BBT toz malzemesinin, üretilen HB'lere %20-30 ikame edilmesinin maliyetleri THB'de ortalama %23, TOHB'lerde ise ortalama %42 azaltacağı gibi özellikle 90 gün sonundaki dayanımlarda puzolanik reaksiyonların gelişmesi ile 30 MPa dayanımlara erişilebileceği kanıtlanmıştır.

## SONUÇ VE ÖNERİLER

### Sonuç

Tekstil fabrikalarının atıklarından elde edilen RBM'ler, kağıt endüstrisi atığı lignin lüköründen elde edilen lignin ve Bayburt tüfü doğal taş endüstrisi atıklarının THB ve THOB üretiminde kullanımını amaçlayan bu tez çalışmasında elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- BST agregasının TS 25'e uygun olarak gerçekleştirilen puzolanik aktivite test sonuçlarına göre puzolanik aktivite değerinin düşük (2,8 MPa) olması nedeniyle puzolan olarak değerlendirilemeyeceği,
- BST'nin ortalama yoğunluk değerinin 2,0 g/cm<sup>3</sup> değerinin hafif üstüne çıktığı için hafif beton üretiminde kullanılamayacağı,
- BST agregasının, pomza ve perlitten daha yüksek dayanım değerleri göstermesi nedeniyle doğrudan normal beton üretiminde kullanılabileceği,
- En az 400 doz çimento ve akışkanlaştırıcı kimyasal katkı kullanılarak oluşturulan BST agregalı karışımların, 30MPa dayanım değerine yakın değerler verdiği ancak agreganın öz dayanımının yetersiz olmasından dolayı ilk kırılmanın agregadan gerçekleştiği,
- BST agregasının yukarıda belirtilen nedenlere ilave olarak, ocaklarının az olması ve bir kısmının kapanması nedeniyle THB ve TOHB üretimi için uygun olmadığı sonucuna varılmıştır.
- TS 25'e göre gerçekleştirilen BBT agregasının puzolanik aktivite değerlerinin 4 MPa'dan yüksek olması (4,4 - 6,2 MPa) puzolan olarak değerlendirilebileceği,
- BBT agregası ile üretilen THB'lerin 28 günlük dayanımlarının düşük olması puzolanik aktivitenin erken yaşlarda henüz etkili bir şekilde başlamadığının ve 90 günlük dayanımlarının ilerleyen puzolanik aktivite nedeniyle ciddi oranda arttığı, en az 400 doz çimento dozajı ile THB üretiminde başarılı bir şekilde kullanılabileceği,
- BBT'nin öz dayanımının yüksek olması, BHA değerinin düşük olması (1,78), puzolanik aktiviteye sahip oluşu, rezervinin fazla olması vb nedenlerle TOHB üretiminde başarı ile kullanılabileceği,
- Sabit 200 kg/m<sup>3</sup> çimento dozajı, sabit çökme (sıfır) ve 0,50 su/çimento oranında üretilen TOHB'lerin dayanımlarının geleneksel hafif betonlarla benzer özellik gösterdiği, özellikleri geliştirildiğinde geleneksel hafif betonlardan daha üstün özelliklere sahip

yeni tür hafif beton türü alternatif olabileceği ve endüstriyel olarak bu alanda değerlendirilebileceği,

- TOHB için hedeflenen en az 5 MPa basınç dayanımına, en az 0,1 MPa sıkıştırma basıncı uygulayarak ulaşılabildiği (4,7 MPa),
- TOHB üretiminde 12 MPa pressleme ile 28 gün standart (TS 771-3) kür uygulanarak üretilen numuneler ile daha yüksek basınç dayanımlarının elde edilebileceği (7,6 MPa),
- Akışkanlaştırıcı katkı kullanımı ile dayanımların artırılabilmesi gibi çimentoya en fazla %30 filler malzeme ikame edilerek maliyetin düşürülebileceği sonuçlarına ulaşıldı.
- Ligninin hava sürüklemeye özelliğinin, betonlarda dayanım kayıplarına sebep olmasına rağmen, ort. %5,8 - 8,8 akışkanlaştırıcı/su azaltıcı etkisi ile bu olumsuzluğun giderildiği,
- Akışkanlaştırıcı olarak çimento ağırlığının %0,6'sı lignin kullanımının, TOHB karışımlarında, 28 gün sonunda doygun ve kuru BHA değerleri sırası ile 1500-1600 g/cm<sup>3</sup> ve 1300-1400 g/cm<sup>3</sup> aralığında olması, hedeflenen D1,6 (1,4<D <1,6) hafif beton sınıfına uygun olduğu,
- Çimento ağırlığının %0,6'sı lignin kullanımının, THB karışımlarında ortalama %7,3 su azaltarak, dayanımı yaklaşık %17,5 artırdığı ve böylece normal akışkanlaştırıcı (NA) sınıfta değerlendirilebileceği,
- Ligninin katı madde olarak betonda normal su azaltıcı/akışkanlaştırıcı katkı olarak kullanımının betonda herhangi bir olumsuz etkiye sebep olmayacağı, aksine betonu donma çözülme etkilerinden koruyacağı gibi çimentolardaki toksik etkili Cr<sup>+6</sup>'yı indirgeyeceği,
- Ülkemizde üretilen çimentoların yüksek krom içeriği nedeniyle Türkiye'nin önemli bir çimento ihracat problemini de çözmeye fayda sağlayacağı,
- Hafif betonda normal su azaltıcı/akışkanlaştırıcı olarak atık RBM'lerin kullanımının, su kesmelerine bağlı olarak süper akışkanlaştırıcı özellik gösterdiği,
- Çimento ağırlığının %0,04'ü oranında akışkanlaştırıcı katkı olarak kullanılan RBM'lerin tümünün, HB'lerin tümündeki referans karışımlarından daha yüksek dayanıma neden olduğu, betonlarda akışkanlaştırıcı katkı olarak başarıyla kullanılabileceği,
- Eklenen atık RBM'lerin betonu renklendirdiği, beton içinde çözünmeyen tuzlar oluşturduğu, suda çözünmediği için doğaya deşarj riskinin ortadan kalktığı, renkli hafif beton üretimi için kullanılabileceği
- Atık RBM'lerin THB üretiminde değerlendirilmesiyle ciddi çevre problemlerinin çözümü için yeni bir alternatif olabileceği,

- YBBT agregalarının en az 30 gün kireçli suda bekletilerek pozolanik aktivitelerinin önceden gerçekleştirilmesi sonucunda bu agrega ile üretilen THB'lerin basınç dayanımlarında % 15 - 25 arasında değişen değerlerde artış olabileceği,
- YBBT agregalarının en az 30 gün sodali suda bekletildikten sonra pozolanik reaksiyonlarının gelişmesi karbonatlaşmalarının gerçekleşmesi sonucunda bu agrega ile, üretilen THB'lerin basınç dayanımlarında, % 13 - 22 arasında değişen değerlerde artışa neden olabileceği,
- YBBT agregalarını önceden suda bekleterek bileşiminde bulunan demir ve magnezyum sülfatlı mineralleri çözünerek uzaklaştırılması ile bu bileşiklerin hidrasyon üzerine olumsuz etkilerinin bertaraf edilebileceği, THB üretiminde bu şekilde kullanımları ile basınç dayanımlarında, % 7- 39 arasında dayanım artışı sağlanabileceği,
- Tüm BBT ve YBBT agregalarıyla hazırlanan betonlarda hidrasyonun 28 günde tamamlanmadığı, 90. günde hidrasyonun büyük ölçüde tamamlandığı,
- İyileştirilme yapılmış YBBT agregaları kullanılarak; sabit 450 kg/m<sup>3</sup> çimento dozajı, sabit çökme (S2, 5-9cm) ve 0,50 su/çimento oranında üretilen THB'lerin dayanımları, hedeflenen en az 30 MPa basınç dayanım değerine, agregalardaki pozolanik aktivitenin ilerlemesine bağlı olarak, 90 günlük kür periyodunda ulaşılabilceği,
- YBBT ikamesi ile üretilen LC25/28 THB 'nin, halen piyasada kullanılan C25/30 betondan ortalama %30 daha hafif ve yaklaşık %10 daha ucuz maliyetle üretilebileceği, böylece yapıların deprem etkisinden çok daha az etkileneceği,
- THB üretiminde, çimentoya %10-20 filler malzeme ikame edilmesinin dayanımı fazla etkilemediği, ancak %20 ikameden sonra dayanımların ciddi şekilde azaldığı, ayrıca ikame oranının artması ile maliyetlerin %15-30 arasında değişen değerlerde düşmesine neden olduğu,
- YBBT tozu İkameli serilerde lignin katkısının RBM1'den daha iyi akışkanlaştırıcı performans sergilediği, ikamesiz serilerde ise RBM1 katkısının ligninden daha iyi akışkanlaştırıcı performans verdiği,
- BBT ikame edilerek üretilen TOHB blok maliyetinin, geleneksel üretim bloklardan yaklaşık %35-50 oranında daha ucuz ve ayrıca daha mukavim olarak üretilebileceği sonucuna varılmıştır.
- **Sonuç olarak;** çevre kirliliğine neden olan BBT ile toksik atık sınıfında değerlendirilen RBM ve lignin atıklarının renkli THB ve TOHB üretiminde başarıyla kullanılabileceği, böylece atıkların bertaraf edilmesine ciddi katkı sağlanacağı ayrıca bu atıkların

tamamının yeni bir atık oluşturmada tamamen beton içinde güvenli bir şekilde immobilize edilebileceği, bu yolla ülke ekonomisine katkı sağlanacağı söylenbilir.

### neriler

- Çalışmanın ekonomik ve durabil olabilmesi için ek olarak;
- Üretilen numunelerin donma- çözülme, yüksek ısı ve ısıl geçirgenlik gibi durabilite açısından teknik özellikleri araştırılabilir.
- Hazırlanan THB ve TOHB'lerin daha düşük s/c oranında yüksek basınç uygulanarak pressle dökülmesi ile çok daha yüksek dayanımlar elde edilebileceği ve imento dosajınının daha da dşrlebilmesine yönelik çalışmalar yapılabilir.
- Tekstil atık suyunda boyar maddelerden başka, kullanılan stabilizatör ve diğer kimyasal maddelerin ayrı ayrı ve topluca hidrasyona etkileri incelenebilir.

## KAYNAKÇA

- Acar, C. T. & Ramyar K. (2024). Ham perlit agregasının betonun mekanik ve taşıma özelliklerine etkisi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 30(3), (386-394).
- Adler, E. (1977). Lignin chemistry-past, present and future. *Wood Science and Technology*, 11(3), 169-218.
- Adhikary, S. K., Ashish, D. K., Sharma, S., Patel, J., Rudzionis, Z., Ajame, M., Thomas, B. S., & Khatib, J. M. (2022). Lightweight self-compacting concrete: A review. *Resources, Conservation & Recycling Advances*. Volume 15, November 2022, 200107 <https://doi.org/10.1016/j.rcradv.2022.200107>
- Akan, İ. E. (2019). *Çanakkale-ayvacık bölgesinde bulunan volkanik tüfün katkılı çimento üretiminde kullanılabilirliğinin incelenmesi* (Yüksek lisans tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 563620)
- Akarsu, F. D. (2024). *Dünya ve Türkiye'deki çimento endüstrisinin CO<sub>2</sub> emisyonunu azaltma yöntemlerinin karşılaştırılması* (Yüksek lisans tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 887742)
- Akgün, Y. (2019). Alternatif puzolan kalsine marn içeren sürdürülebilir katkılı çimentolar. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 10(2), 779-789.
- Akman, S. (2003). Yapı malzemelerinin tarihsel gelişimi. *Türkiye Mühendislik Haberleri*, (426), 4.
- Alanko, K., Keskinen, H., Björkstén, F., & Ojanen, S. (1978). Immediate-type hypersensitivity to reactive dyes. *Clinical and Experimental Allergy: Journal of the British Society for Allergy and Clinical Immunology*, 8(1), 25-31. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2222.1978.tb00444.x>
- Aldakshe, A., Çağlar, H., Çağlar, A., & Avan, Ç. (2020). The investigation of use as aggregate in lightweight concrete production of boron wastes. *Civil Engineering Journal*, 6(7), 1328-1335. <https://doi.org/10.28991/cej-2020-03091551>
- Alqahtani, F. K., Ghataora, G., Khan, M.I., & Dirar, S.(2017). Novel lightweight concrete containing manufactured plastic aggregate, *Construction and Building Materials*, Volume 148, 1 September 2017, Pages 386-397, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.011>
- American Concrete Institute. (2014). *ACI 213R-14: Guide for structural lightweight-aggregate concrete*. Farmington Hills, MI: American Concrete Institute.
- Arıcı, E. (1997). *Van yöresindeki volkanik tüfün beton mukavemetine etkisi ve taşıyıcı hafif beton agregası olarak kullanılabilirliğinin araştırılması* (Yüksek lisans tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 65901)
- Arnavutoğlu, E. (2024). *Borik asit katkısının alçı sıvanın mikroyapısına etkilerinin araştırılması* (Yüksek lisans tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 891472).
- Arslan, M., Aslan, Z., & Dokuz, A. (2004). Bayburt tüflerinin petrografik, petrokimyasal ve petrolojik özellikleri: Doğu Pontid Güney Zonu'nda Eosen kalkalkalen felsik volkanizması. *Selçuk Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 20(1), 1-12.

- ASTM International. (1994). *Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete (ASTM C618-94)*. West Conshohocken, PA: ASTM International. <https://doi.org/10.1520/C0618-94>
- Aslam, M., Shafigh, P., Jumaat, M. Z., & Lachemi, M. (2016). Benefits of using blended waste coarse lightweight aggregates in structural lightweight aggregate concrete. *Journal of Cleaner Production*, 119, 108-117. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.01.071>
- ASTM International. (2022). *Standard specification for Portland cement (ASTM C150/C150M-22)*. West Conshohocken, PA: ASTM International. <https://doi.org/10.1520/C0150-C0150M-22>
- ASTM International. (2004). *Standard test method for Marsh funnel viscosity of clay construction slurries (ASTM D6910-04)*. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- ASTM International. (2007). *Standard test method for flow of hydraulic cement mortar (ASTM C1437-07)*. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- Avşaroğlu, N. (2020). *Anadolu'nun binlerce yıllık doğal taşları*. Ankara: MTA Genel Müdürlüğü.
- Aydın, G. M. (2023). *Tekstil atığı reaktif boyar maddelerin çimento katkı maddesi olarak değerlendirilmesi*. (Yüksek lisans tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No.786216 )
- Aydın, S. (2010). *Alkalilerle aktive edilmiş yüksek fırın cürufu bağlayıcılı lifli kompozit geliştirilmesi* (Doktora tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez no. 276485)
- Azadi, P., Inderwildi, O. R., Farnood, R., & King, D. A. (2013). Liquid fuels, hydrogen and chemicals from lignin: A critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 21, 506-523. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.12.022>
- Bajpai, P., & Bajpai, P. K. (1994). Biological colour removal of pulp and paper mill wastewaters. *Journal of Biotechnology*, 33(3), 211-220. [https://doi.org/10.1016/0168-1656\(94\)90069-8](https://doi.org/10.1016/0168-1656(94)90069-8)
- Baquerizo, L. G., Matschei, T., Scrivener, K. L., Saeidpour, M., & Wadsö, L. (2015). Hydration states of AFm cement phases. *Cement and Concrete Research*, 73, 143-157.
- Baradan, B., Türkel, S., Yazıcı, H., Ün, H., Yiğiter, H., Felekoğlu, B., Felekoğlu, K., Aydın, S., Yardımcı, M. Y., Topal, A., & Öztürk, A. U. (2015). *Beton* (Yayın No. 334). İzmir: Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları.
- Barghouthi, M. I., El-Eswed, B., Khalili, F., & Ammari, M. (2007). Adsorption behavior of anionic reactive dyes on H-type activated carbon: Competitive adsorption and desorption studies. *Separation Science and Technology*, 42(10), 2195-2220. <https://doi.org/10.1080/01496390701444030>
- Başer, İ., & İnanıcı, Y. (1990). *Boyarmadde kimyası*. İstanbul, Türkiye: Marmara Üniversitesi Matbaası.
- Begarin, F., Garrault, S., Nicoleau, L., & Nonat, A. (2011). Hydration of alite containing C<sub>3</sub>A in the presence of sulfate. *Cement and Concrete Research*, 41(3), 229-236.
- Berlin, A., & Balakshin, M. (2014). Industrial lignins: Analysis, properties, and applications. In V. K. Gupta, M. G. Tuohy, C. P. Kubicek, J. Saddler, & F. Xu (Eds.), *Bioenergy research: Advances and applications* (Chap. 18, pp. 315-336). Amsterdam: Elsevier.

- Bertella, S., & Luterbacher, J. S. (2020). Lignin functionalization for the production of novel materials. *Trends in Chemistry*, 2(5), 440-453. <https://doi.org/10.1016/j.trechm.2020.03.001>
- Beycioğlu, A., Başığit, C., & Kılınçarslan, Ş. (2005). Pomza agregalı hafif beton özelliklerine silis dumanının etkisi. *Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 14-2(2010),200-205
- Bogas, J. A. & Cunha, D. (2017). Non-structural lightweight concrete with volcanic scoria aggregates for lightweight fill in building's floors. *Construction and Building Materials*. Volume 135, 15 March 2017, Pages 151-163. [doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.213](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.213)
- Bozok, N. (2005). *Vinilsülfon ve flor grubu içeren reaktif boyarmadde sentezi ve metal kompleksleri* (Yüksek lisans tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez no. 198091)
- Bullard, J. W., Jennings, H. M., Livingston, R. A., Nonat, A., Scherer, G. W., Schweitzer, J. S., & Scrivener, K. L. (2011). Mechanisms of cement hydration. *Cement and Concrete Research*, 41(12), 1208-1223. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.09.011>
- Bulut, Ü. (2007). *Perlitin puzolanik aktivitesi* (Doktora tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 222277)
- Campo F. P., Tua, C., Biganzoli, L., Pantini S. & Grosso, M. (2021) Natural and enhanced carbonation of lime in its different applications: A review, *Environmental Technology Reviews*, 10/1, 224-237, DOI: 10.1080/21622515.2021.1982023
- Carlsson, A. S. (2009). Plant oils as feedstock alternatives to petroleum: A short survey of potential oil crop platforms. *Biochimie*, 91(6), 66-670. <https://doi.org/10.1016/j.biochi.2009.03.021>
- Cengiz, H. Y. (2018). *Tekstil endüstrisinde fonksiyonel polimerlerin yardımcı kimyasal olarak kullanımının incelenmesi* (Yüksek lisans tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 533699)
- Şenbil, U. E. (2020, 18 Aralık). *Türkiye’de kimyasal beton katkılarının son beş yıllık üretim hacmi ve istatistiki değerlendirmesi*. CemenTürk Dergisi. Erişim adresi: <https://cementurk.com.tr/turkiye-de-kimyasal-beton-katkilarinin-son-bes-yillik-uretim-hacmi-ve-istatistiki-degerlendirmesi/>
- Cerro, E. (2018). Cement microstructure: Fostering photocatalysis. In *IntechOpen*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.74365>
- Ciach, T. D., Gillott, J. E., Swenson, E. G., & Sereda, P. J. (1971). Microstructure of calcium silicate hydrates. *Cement and Concrete Research*, 1(1), 13-25. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(71\)90080-9](https://doi.org/10.1016/0008-8846(71)90080-9)
- Ciceralli, D. (2015). *Bayburt (KD Türkiye) yöresi eosen yaşlı tüflerde gelişen zeolitleşmenin mineralojisi, jeokimyası ve kökeni* (Yüksek lisans tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No.389944).
- Costa, U., & Massazza, F. (1977). Influenza del trattamento termico sulla reattività con la calce di alcune pozzolane naturali. *Il Cemento*, 3, 105-122.
- Çimen, Ö., Dereli, B., & Keleş, E. (2020). Üç farklı bölgeye ait pomzanın yüksek plastisiteli kile etkisinin karşılaştırılması. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 9(1), 427-433. <https://doi.org/10.17798/bitlisfen.570980>

- Çimen, S. (2023). *Volkanik tüf atıkları kullanılarak üretilen silika aerojel katkılı hafif betonun mühendislik özelliklerinin incelenmesi*. (Doktora tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No.844119)
- Danner, T., Østnor T., & Justnes, H., (2012). Calcined marl as pozzolana for sustainable development of the cement and concrete industry, *In Proceedings of the 12th Canmet/ACI International Conference on Recent Advances in Concrete Technology and Sustainability Issues*, SP-289, 357-365.
- Demiral, N. (2008). *Pamuklu tekstil endüstrisi atıksularının membran teknolojisi ile geri kazanımı*. (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No, 232775)
- Devlet Planlama Teşkilatı [DPT]. (2005). *Sekizinci beş yıllık kalkınma planı, madencilik özel ihtisas komisyonu raporu: yapı malzemeleri - Genleşen kil* (ss. 69-73). Ankara: DPT Yayınları. <http://ekutup.dpt.gov.tr/madencil/sanayiha/oik628.pdf>
- Dilnesa, B. Z., Snellings, R., Lothenbach, B., Alderete, N. M., Cizer, Ö., & Van Balen, K. (2014). Fe-containing phases in hydrated cements. *Cement and Concrete Research*, 58, 45-55.
- Dodds, D. R., & Gross, R. A. (2007). Chemicals from biomass. *Science*, 318(5854), 1250-1251.
- Dokuzoğlu, Z., Alkan, U. & Yentürk A., (2008). Reaktif boyar madde içeren tekstil atıksularının ileri oksidasyonu. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 13(2), 2008
- Duvarcı, Ö. Ç., Akdeniz, Y., Özmihçı, F., Ülkü, S., Balköse, D., & Çiftçioğlu, M. (2007). Thermal behaviour of a zeolitic tuff. *Ceramics International*, 33(5), 795-801. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2006.01.003>
- Erdem, E., Aydın, G. M., & Kılınçarslan, R. (2024). Production of high strength and colored concrete using textile waste reactive dyestuffs as superplasticizers. *Construction and Building Materials*, 418 (2024) 135382, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135382>
- Erdem, E., Güngörmüş, H., & Kılınçarslan, R. (2016). The investigation of some properties of cement and removal of water soluble toxic chromium(VI) ion in cement by means of different reducing agents. *Construction and Building Materials*, 124, 626-630. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.087>
- Erdoğan, T. Y. (1995). Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu ve kullanımı. In *Endüstriyel atıkların inşaat sektöründe kullanılması sempozyumu bildiriler kitabı* (pp. 1-11). TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası.
- Erdoğan, T. Y. (2015). *Beton*. Ankara: ODTÜ Yayıncılık.
- Erdoğan, K. (1996). *Effects of pozzolanic additions on grindability and some mechanical properties of pozzolanic cements of different fineness values* (Yüksek lisans tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir.
- Eser, H. (2014). *Ham perlit agregası ve perlit tozu kullanılarak yapılan yüksek performanslı taşıyıcı hafif beton* (Yüksek lisans tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No.365605)
- Fengel, D. & Wegener, G. (1989). *Wood-Chemistry, Ultrastructure, Reactions*, Walter de Gruyter, Berlin, Germany
- Finch, J. K. (1954). *The story of engineering*. New York: Anchor Publishing.

- Frahat, B. N., Malek, A. S., Ali, A., & Ibrahim, O. M. O. (2024). New strategy for closing the plastic loop: Lightweight concrete by the waste of recycled synthetic fibers. *Construction and Building Materials Volume 423*, 12 April 2024, 135896, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135896>
- Fu, Y. (1996). *Delayed ettringite formation in Portland cement products* (Ph.D. thesis, University of Ottawa).
- Gallucci, E., & Scrivener, K. L. (2007). Crystallisation of calcium hydroxide in early-age model and ordinary cementitious systems. *Cement and Concrete Research*, 37(4), 492-501.
- Ganesh Babu, K., & Sree Rama Kumar, V. (2000). Efficiency of GGBS in concrete. *Cement and Concrete Research*, 30(7), 1031–1036. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00271-4](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00271-4)
- Gençtürk, G. (2011). *Sönmüş kireç ile çimento ve pr plast kullanımının asfalt kaplamaların mekanik özellikleri üzerindeki etkileri* (Yüksek lisans tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 275493)
- Gordon, S., & Hsieh, Y. L. (2007). *Cotton: Science and technology*. Cambridge: Woodhead Publishing.
- Gül, Ü. D., & Yıldız, Y. (2020). Yüzey aktif madde ile modifiye edilmiş atık yer fıstığı kabuğunun tekstil boyası biyosorpsiyon kapasitesinin belirlenmesi. *Turkish Journal of Agricultural and Natural Science*, 7(3), 533-539.
- Gülsoy, S. K., & Pekgözlü, A. (2023). Lignin: Sınıflandırılması ve molekül ağırlığı. In *Ziraat, Orman ve Su Ürünleri Alanında Uluslararası Araştırma ve Değerlendirmeler* (1. Bs., Bölüm 9).
- Gündüz, L., Şapçı, N., & Bekar, M. (2006). Genleşmiş kilin hafif agrega olarak kullanılabilirliği. *Kil Bilimi ve Teknolojisi Dergisi*, 1(2), 43-49.
- Gündüz, L., Sarıışık, A., Davraz, M., Uğur, D., & Çankıran, O. (1998). Pomza Teknolojisi Cilt II, SDÜ Yayını, Isparta.
- Gündüzalp, A. A., & Güven, S. (2016). Atık, çeşitleri, atık yönetimi, geri dönüşüm ve tüketici: Çankaya Belediyesi ve semt tüketicileri örneği. *Hacettepe Üniversitesi Sosyolojik Araştırmalar E-Dergisi*, 1-19.
- Güngör, N., 1981. *Bentonik kil minerallerinin yapı ve özellikleri üzerine değişebilen katyonlarının etkilerinin fiziksel yöntemlerle incelenmesi* (Doktora tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir.
- Gürdal, E. (2010, Mart). [Makale başlığı yok]. *dergi-423mart.indb*, s. 37. İstanbul Teknik Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü, Yapı Bilgisi Anabilim Dalı.
- Helvacı, C. & Alaca, O. (1991). Bigadiç borat yatakları ve çevresinin jeolojisi ve mineralojisi. *MTA Dergisi*, 113, 61-92.
- Heniegal, A. M., Amin, M., Abdelaziz, N., & Tahwia, A. M. (2024). Sustainable disposal of different solid wastes as aggregate for fabricating lightweight concrete: Physio-mechanical performance and durability. *Advances in Science and Technology*, 152, 33-50. <https://doi.org/10.4028/p6ETZhO>
- Hewlett, P. C. (1998). *Lea's chemistry of cement and concrete* (4th ed.). New York: John Wiley & Sons Inc.
- Hill, C. (2006). *Wood modification: Chemical, thermal and other processes*. Chichester, UK: John Wiley & Sons.

- Holm, T. A., (1980). Performance of structural lightweight concrete in a marine environment. In *Proceedings of the Performance of Concrete in Marine Environments* (pp. 589-608). St. John, New Brunswick, Canada
- Huş, S. (1971). Lignin ve kullanış yerleri. *İstanbul Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi, Seri B*, 21(1).
- IEA Bioenergy. (2007). *Summary and conclusions from the IEA Bioenergy ExCo54 workshop: Black liquor gasification* (ExCo:2007:03). Paris: International Energy Agency. Retrieved from <https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2013/10/ExCo2007-03.pdf>
- İçoğlu, H. İ. (2006). *Pamuklu dokunmuş kumaşların reaktif boyarmaddelerle boyanması ve uygulama yöntemlerinin incelenmesi* (Yüksek lisans tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez no,198079).
- İnşaat Mühendisleri Odası (İMO). (2007). *Guide for structural lightweight aggregate concrete* (ACI 213R-87). İzmir Şubesi Bülteni-Temmuz, Sayı: 135.
- İnşaat Mühendisleri Odası (İMO). (2015). *K.T.M.M.O.B. İnşaat Mühendisleri Odası, Yapı İşleri Teknik Şartnamesi*. Yayın Tarihi:02/01/2013 Revizyon No: 02/07/15 Form: IMO.V.B.003 Sayfa: 1
- İşçi, S., (2002). *Bentonit dispersiyonlarına organik ve inorganik katkıların adsorbsiyonunun reolojik özellikleri üzerine etkisi* (Yüksek lisans tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 126753)
- Jawed, I., Goto, S., & Kondo, R. (1976). Hydration of portland cement. *Cement and Concrete Research*, 6, 441-449.
- Jennings, H. M. (1983). In S. N. Ghosh (Ed.), *Advances in cement technology* (pp. 349). Oxford: Pergamon Press.
- Justnes H, Østnor, T., & Danner, T., (2011). Calcined marl as effective pozzolana. In *Proceedings of the International Rilem Conference on Advances in Construction Materials through Science and Engineering*, Hong Kong, China, Rilem Pro 79, pp. 750-758
- Kaçar, M. (2014). *Bayburt taşının üç boyutlu işlenebilmesi için mekanik sistemin ve Kontrol yazılımının gerçekleştirilmesi* (Yüksek lisans tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No.348500)
- Kalkan, Ş., O. & Gündüz, L. (2023). Tane boyutu ve dehidratasyon sıcaklığının anhidrit alçı özelliklerine etkisi üzerine bir çalışma. *KSÜ Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 26(2)
- Karaduman, İ. İ. (2023). *Zeolitin betonun donma çözülme dayanımına etkisi*. (Yüksek lisans tezi).Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No.776239)
- Katkı Üreticileri Birliği. (2022, Ocak). KÜB 2021 Sektör Raporu [Teknik Bülten]. Katkı Üreticileri Birliği. Erişim adresi: <https://kub.org.tr/wp-content/uploads/2024/08/KUB-2021-Teknik-Bulten.pdf>
- Khatri, A., White, M., & Glover, R. (2015). A review on developments in dyeing cotton fabrics with reactive dyes for reducing effluent pollution. *Journal of Cleaner Production*, 87, 50–57.
- Khviyuzov, S. S., Bogolitsyn, K. G., & Gusakova, M. A. (2024). The effect of hydrogen bonds on the reactivity of coniferous and deciduous dioxan lignins. *Journal of Wood Chemistry and Technology*, 44(4), 244-252.

- Kılıçaltan, S., & Demir, U. (2021). Hafif blok üretiminde Çanakkale-ayvacık volkanik tüfünün agrega olarak kullanılabilirliğinin araştırılması. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 12(5), 821-828. <https://doi.org/10.24012/dumf.1051469>
- Kızılkaya, N. & Sarıcı, D. E. (2020). Alüminyum tozu ve su oranının gaz betonun fizikomekanik özelliklerine etkisinin incelenmesi. *International Battalgazi Scientific Studies Congress-V*, Malatya, Türkiye, 18 - 20 Aralık 2020, ss.28-37, (Tam Metin Bildiri)
- Kim, C. H., Lee, J. Y., Park, S. H., & Moon, S. O. (2019). Global trends and prospects of black liquor as bioenergy. *Journal of Korea Technical Association of the Pulp and Paper Industry*, 51(5), 3-15. <https://doi.org/10.7584/JKTAPPI.2019.10.51.5.3>
- Kim, H.-H., & Park, C.-G. (2016). Plant growth and water purification of porous vegetation concrete formed of blast furnace slag, natural jute fiber and styrene butadiene latex. *Sustainability*, 8(4), 386. <https://doi.org/10.3390/su8040386>
- Kinder, H., & Hilgemann, W. (1964). *DTV Atlas zur Weltgeschichte*. München: Deutscher Taschenbuch Verlag GmbH.
- Kireç. org. (11.08.2025). *Gazbeton üretiminde kireç kullanımı*. Erişim adresi: <https://kirec.org/sayfa/bolum-s16>
- Kosmatka, S. H., Kerkhoff, B., & Panarese, W. C. (2002). *Design and control of concrete mixtures* (14th ed.). Skokie, IL: Portland Cement Association.
- Kozlu, H. H. (2010). *Kayseri yöresindeki tarih harçların karakterizasyonu ve onarım harçlarının özellikleri* (Doktora tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 293858)
- Kökipek, B. (2010). *Suni alçının çimento üretiminde kullanılabilirliği* (Yüksek lisans tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 266153)
- Kuhad, R. C., & Singh, A. (2007). *Lignocellulose biotechnology: Future prospects*. New Delhi: IK International Pvt Ltd.
- Kurbetci, Ş. (2022). Buhar kürünün uçucu küllü kendiliğinden yerleşen betonların kısa ve uzun süreli basınç dayanımına etkisi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 10(1), 28-37.
- Kusin, F. M., Hasan, S. N. M. S., Hassim, M. A., & Loretta, V. M. (2020). Environmental mineral carbonation of sedimentary mine waste for carbon sequestration and potential reutilization as cementitious material. *Environmental Science and Pollution Research*, 27, 12767-12780. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-07877-3>
- Kuzel, H. J. (1996). Initial hydration reactions and mechanisms of delayed ettringite formation in portland cements, *Cement and Concrete Composites*, 18(3), (195-203).
- Laurent, A., Bakas, I., Clavreul, J., Bernstad, A., Niero, M., Gentil, E., & Hauschild, M. (2014). Review of LCA studies of solid waste management systems - Part I: Lessons learned and perspectives. *Waste Management*, 34(3), 573-588.
- Lewis, D. M. (2014). Developments in the chemistry of reactive dyes and their application processes. *Coloration Technology*, 130(6), 382-412. <https://doi.org/10.1111/cote.12114>
- Liao, S. ,Ma, K. ,Xu, H. , Zhang, Y., Zhang, Z. & Wu, L. (2024). Integrated gypsum composite material for energy storage and thermal insulation: Assessment of mechanical

- performance, thermal properties and environmental impact. *Journal of Building Engineering*, 93(2024) 109846 Contents. doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.109846
- Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü. *Kireç*. Erişim adresi: <https://www.mta.gov.tr/v3.0/sayfalar/mineraller/kirec>
- Mahmmoud, L. M. R., Dulaimi, A., Bernardo, L. F. A. & Andrade, J. M. A. (2024). Characteristics of lightweight concrete fabricated with different types of strengthened lightweight aggregates. *Journal of Composites Science*, 8(4), 144, doi.org/10.3390/jcs8040144
- Malquori, G. (1962). Portland-pozzolana cement. In *proceedings of the 4th international symposium on the chemistry of cement*, Washington, 1960. National Bureau of Standards.
- Mass, R., & Chaudhari, S. (2005). Adsorption and biological decolorization of azo dye Reactive Red-2 in semi-continuous anaerobic reactors. *Process Biochemistry*, 40, 699-705.
- Matveeva, O. I., Baishev, N. K. ,Makarov, A. I. ,Popov, A. L. , Pavlyukova, I. R. & Grigoriev, N. A. (2024). Enhancing lightweight concrete strength through modified zeolite-alkaline porous aggregate: Composition optimization and structural application. *Magazine of Civil Engineering*. 2024. 17(1). Article No. 12507, DOI: 10.34910/MCE.125.7
- Mavioğlu, Ü. A. (2011). *Farklı puzolandık katkılar ile hazırlanan horasan harçlarının değişen parametrelerinin incelenmesi*, (Yüksek lisans tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 311919 ).
- Mindess, S., & Young, J. F. (1981). *Concrete*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, Inc.
- Mijan, R. S., Momeni, M., & Hadianfard, M. A. (2024). Impact of fine lightweight aggregates and coal waste on structural lightweight concrete: Experimental study and gene expression programming. *Structures*. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.106397> Structures 63 (2024) 106397
- Motschi, H. (2000). ETAD guidance on hazard labelling of reactive dyes. *Journal of the Society of Dyers and Colourists*, 116, 251-252.
- Mullick, A. K. (1996). Use of lignin-based products in concrete. In R. Siddique (Ed.), *Waste materials used in concrete manufacturing* (pp. 352-429). Elsevier.
- Nakaria, Y. (2015). Effect of carbonation on strength development of cement-treated Toyoura silica sand. *Soils and Foundations*, 55(6), 1223-1232.
- Nayır, S. (2021). *Pomza ve perlit agregası içeren mineral katkılı taşıyıcı hafif betonların enerji performansı açısından değerlendirilmesi* (Doktora tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 705257 )
- Nazlı, T. (2018). *Genleştirilmiş vermikülit tozu ile modifiye edilmiş çimento esaslı harçların yüksek sıcaklık dirençleri* (Yüksek lisans tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 542019 )
- Neville, A. M. (1981). *Properties of concrete*. (3. bas.). London: Pitman Publishing.
- Onat, O. B. (1998). *'Türkiye'de üretilen yüksek fırın cürufklarının çimento özelliklerine etkisi'* (Yüksek lisans tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No.75413)
- Orhun, O. (1969). Perlit. *Bilimsel Madencilik Dergisi*, 8(4), 213-222.

- Ormsby, C., & Liu, R. (2005). A look at transportation forensics. *Public Roads*, 68(6). <http://www.tfhr.gov/pubrds/05may/03.htm>
- Özcan, Y. (1978). *Tekstil elyaf ve boyama tekniği*. İstanbul: İstanbul Üniversitesi Yayınları, Kimya Fakültesi, Fatih Yayınevi Matbaası.
- Öztürk, M. (2004). *Pamuklu örme kumaşların reaktif boyalarla boyanması* (Yüksek lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü. <https://tez.yok.gov.tr> (Tez No. 151541)
- Pekgöz, M., & Tekin, İ. (2021). Microstructural investigation and strength properties of structural lightweight concrete produced with zeolitic tuff aggregate. *Journal of Building Engineering*, 43, 102863. <https://doi.org/10.1016/j.job.2021.102863>
- Pomza Araştırma ve Uygulama Merkezi. (2015, Temmuz). *Pomza araştırma ve uygulama merkezi fizibilite raporu*. Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü.
- Prakash, A., Pushpadass, H. A., & Kalangi, H. S. (2015). Thermochemical valorization of lignin. In S. Saravanamurugan et al. (Eds.), *Recent advances in thermo-chemical conversion of biomass* (pp. 455-478). Elsevier.
- Rafieizonooz, M., Kim, J. H. J., Kim, J., Jo, J. B., & Khanh Haje, E. (2024). Microstructure, XRD, and strength performance of ultra-high performance lightweight concrete containing artificial lightweight fine aggregate and silica fume. *Journal of Building Engineering*, 94, 109967. <https://doi.org/10.1016/j.job.2024.109967>
- Ranka, A. A. (2022). Lime as construction material: Process & Application. *Futuristic Trends in Construction Materials & Civil Engineering* e-ISBN: 978-93-5747-754-3 IIP Proceedings, Volume 2, Book 11, Part4, Chapter 3
- Motloq, R. F., Khalil, W. I., Dawood, E. T., & Ahmed, H. K. (2024). Possibility of production high strength lightweight concrete containing organic waste aggregate and recycled steel fibers. *Open Engineering*, 14(1), Article 20220584. <https://doi.org/10.1515/eng-2022-0584>
- Regourd, M. (1986). Slags and slag cements. In R. N. Swamy (Ed.), *Cement replacement materials* (pp. 73-99). Surrey University Press.
- Ritter, S. K. (2008). Lignocellulose: A complex biomaterial. *Chemical & Engineering News*, 86(49), 15.
- Santos, T. A., Oliveira E. Silva, G. A., & Ribeiro, D. V. (2020). Mineralogical analysis of Portland cement pastes rehydrated. *The Journal of Solid Waste Technology and Management*, 46(1), 15-23. <https://doi.org/10.5276/jswtm/2020.15>
- Sersale, R. (1958). Genesi e costituzione delle tufo giallo napoletano. *Rendiconti dell'Accademia delle Scienze Fisiche, Matematiche e Naturali della Società Nazionale di Scienze, Lettere ed Arti, Napoli*, 25(4), 181-207.
- Sim, J.-H. & J.-S.J.A.C.f.E. Park, (2007). Effect of lignin addition on characteristics of cement pastes. 2007. 18(2): p. 178-182. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.07.125>
- Singh, L. P., Karade S. R., Bhattacharyya S. K., Yousuf M. M, & Ahalawat S. (2013). Beneficial role of nanosilica in cement based materials - A review. *Construction and Building Materials* Volume 47, October 2013, Pages 1069-1077. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.052>

- Skalny, J., Mindess, S., & Marchand, J. (2001). *Calcium hydroxide in concrete* (Special volume). Westerville: The American Ceramic Society.
- Spellman, F. R. (1982). Granulated blast furnace slag as a material admixture. *Concrete International*, Temmuz 1982, 66-71.
- Stark, J., & Bollmann, K. (1999). Delayed ettringite formation in concrete. *Nordic Concrete Research*. <https://www.itn.is/ncr/publications/doc-23-2.pdf>
- Straub, H. (1964). *History of civil engineering*, Cambridge MA, MIT Press
- Sujatha<sup>1</sup>, A. & Balakrishnan, S. D. (2024). Development of an eco-friendly high-strength lightweight concrete using pre-treated coconut shell aggregate and ground-granulated blast furnace slag. *Innovative Infrastructure Solutions* (2024) 9:191 *Division of Civil Engineering, School of Engineering, Cochin University of Science and Technology, Kochi, India* <https://doi.org/10.1007/s41062-024-01510-9>
- Swolfs, M., & Goeminne, T. (2008). *Building with lime – Exchange of experiences from academic producers in the field*. Arte Constructo.
- Şahin, H. (2018). *Bayburt taşı olarak bilinen tüflerin çimento üretiminde mineral katkı olarak kullanılabilirliği*. (Yüksek lisans tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 534524)
- Şimşek, N., (2021). *Kenevir lifi, keçi kılı ve polipropilen elyaf katkılı horasan harcının özelliklerinin araştırılması* (Yüksek lisans tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez no. 678652)
- Şimşek, O. (2020). *Beton ve beton teknolojisi: Çeşitleri, özellikleri ve deneyleri*. Ankara: Seçkin Yayıncılık. ISBN: 978-975-02-6193-0
- Şişman, H., Kocaman, M., & Gezer, S. (2008). Doğal zeolitten üretilecek hafif betonun tarımsal yapılarda kullanılabilirliği üzerine bir araştırma. *Tekirdağ Ziraat Fakültesi Dergisi*, 5(2), 187-195.
- Tang, Z., Li, W., Tam, V. W. Y., & Xue, C. (2020). Advanced progress in recycling municipal and construction solid wastes for manufacturing sustainable construction materials. *Resources, Conservation & Recycling: X*, 6, 100036. <https://doi.org/10.1016/j.rcrx.2020.100036>
- Taylor, H. F. W. (1997). *Cement chemistry, second edition* (2nd ed.). London, Thomas Telford,
- Tekin, I., Kotan, T., Osmanson, A. T., Brostow, W., Gencil, O., & Martinez-Barrera, G. (2020). Properties of lightweight concrete blocks with waste zeolitic tuff. *Materials Science*, 26(4), (463-470). <https://doi.org/10.5755/j01.ms.26.4.22777>
- Tobón, I., Jorge, et al. (2015). Structural and nano-mechanical properties of calcium silicate hydrate (C–S–H) formed from alite hydration in the presence of sodium and potassium hydroxide. *Cement and Concrete Research*, 74, 88-94. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.04.006>
- Türkiye Hazır Beton Birliği [THBB]. (2023). *Hazır beton sektörü raporu 2023*. <https://www.thbb.org/haberler/turkiye-hazir-beton-sektoru-raporu-2023>, Türkiye Hazır Beton Birliği
- Türk Patent Enstitüsü. [TPE] (2019). *Doğal taş: Bayburt taşı* (Menşei adı: 442). Bayburt Belediyesi.
- Türk Standardları Enstitüsü [TSE]. (1978). *TS 3234: Bimsbeton yapım kuralları, karışım hesabı ve deney metotları*. Ankara: Türk Standardları Enstitüsü

- Türk Standardları Enstitüsü. (1999). *TS EN 932-2: Agregaların genel özellikleri için deneyler - Bölüm 2: Laboratuvar numunelerin azaltılması metodu*. Ankara: Türk Standardları Enstitüsü
- Türk Standardları Enstitüsü. (2001). *TS EN 1097-7: Agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri için deneyler - Bölüm 7: Dolgu malzemesi tane yoğunluğunun tayini - Piknometre yöntemi*. Ankara: Türk Standardları Enstitüsü
- Türk Standardları Enstitüsü. (2008). *TS 25: Doğal puzolan (tras) - Çimento ve betonda kullanılan - Tarifler, gerekler ve uygunluk kriterleri*. Ankara: Türk Standardları Enstitüsü
- Türk Standardları Enstitüsü. (2009). *TS 802: Beton karışım tasarım hesapları*. Ankara: Türk Standardları Enstitüsü
- Türk Standardları Enstitüsü. (2010). *TS EN 934-2: Kimyasal katkılar beton, harç ve şerbet için - Tarifler ve özellikler, uygunluk, işaretleme ve etiketleme*. Ankara: Türk Standardları Enstitüsü.
- Türk Standardları Enstitüsü. (2012). *TS EN 933-1: Agregaların geometrik özellikleri için deneyler - Bölüm 1: Tane büyüklüğü dağılımının tayini - Eleme yöntemi*. Ankara: Türk Standardları Enstitüsü
- Türk Standardları Enstitüsü. (2013). *TS EN 1097-6: Agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri için deneyler - Bölüm 6: Tane yoğunluğunun ve su emme oranının tayini*. Ankara: Türk Standardları Enstitüsü
- Türk Standardları Enstitüsü. (2017). *TS 2511: Taşıyıcı hafif betonların karışım hesap esasları*. Ankara: Türk Standardları Enstitüsü
- Türk Standardları Enstitüsü. (2021). *TS EN 206 +A2: Beton - Özellik, performans, imalat ve uygunluk*. Ankara: Türk Standardları Enstitüsü
- Türkel, S. (2007). Beton Köşesi, *İMO İzmir Şubesi Bülteni*, (135), Temmuz.
- Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği. [TÇMB]. (2007). *Silis dumanı ve çimento katkı maddesi olarak kullanımı*. Ankara: Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği Yayını.
- Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği Ar-Ge Enstitüsü. (2009). *Çimentoda standartlar ve mineral katkılar* (Yayın No. TÇMB/AR-GE/Y04.01; 4. baskı). Ankara: Dumat Ofset Matbaacılık San. Tic. Ltd. Şti.
- Türkiye Teknoloji Geliştirme Vakfı. [TTGV]. (2012). *Demir-çelik sektörü atıklarının ekonomiye kazandırılması* (Şubat 2012 Raporu). Ankara: Türkiye Teknoloji Geliştirme Vakfı Yayını.
- Ulus, H. (2006). *Erzincan ve Nevşehir yöresi pomzalarının çimentolu sistemlerde kullanılabilirliği* (Doktora tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No.196648).
- Ulus, İ. (2007). *Ham perlit agregası kullanılarak yüksek dayanımlı hafif beton üretilebilirliği*, (Doktora tezi), Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 200791)
- Urhan, S. (2000). Temel yapı malzemesi çimentonun öyküsü, *Metallurji*, 24(124), 32-45.
- Usta, M. (2019). *Kalsine marn katkılı çimentoya uygun kimyasal katkıların belirlenmesi* (Yüksek lisans tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 587179)

- Ünal, S., Yücel, O., Kurt, M. C., & Gül, S. (2014). Atık'tan ürün'e demir-çelik cürufu. *İleri Teknolojiler Çalıştayı Bildiriler Kitabı*, 255-267.
- Vijayalakshmi R. & Ramanagopal S. (2018). Structural concrete using expanded clay aggregate: A Review, *Indian Journal of Science and Technology*, Vol 11(16), doi: 10.17485/ijst/2018/v11i16/121888, April 2018
- Wakelyn, J. P., Bertoniere, N. R., French, A. D., Thibodeaux, P. D., Triplett, A. B., Rousselle, M. A., Goynes, R. W., Edwards, J. V., Hunter, L., McAlister, D. D., & Gamble, G. R. (2007). *Cotton fiber chemistry and technologies* (pp. 116-117). Boca Raton, FL: Taylor & Francis Group, CRC Press.
- Welham, A. (2000). The theory of dyeing (and the secret of life). *Journal of the Society of Dyers and Colourists*, 116, 140-143,
- Yağcıoğlu, U. C., Bak, T., & Şen, C. (2019). Bayburt taşı (Tüfit). *Mavi Gezegen*, 5(26), 91-95.
- Yao, H., Wang, Y., Liu, J., Xu, M., Ma, P., Ji, J., & You, Z. (2022). Review on applications of lignin in pavement engineering: A recent survey. *Frontiers in Materials*, 8, 803524. <https://doi.org/10.3389/fmats.2021.803524>
- Yıldırım, A. Ö. (2009). *Bazı reaktif boyar maddelerin ileri oksidasyon yöntemleriyle parçalanmasının incelenmesi* (Doktora tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir.
- Yıldız, A. A., & Kuşcu, M. (2001). Afyon tüflerinin yapıtaşı olarak kullanılabilirliğinin araştırılması. *Türkiye Mermer Sempozyumu (MERSEM 2001) Bildiriler Kitabı*, Afyon.
- Yılmaz, A. O., Genç, A., & Koyuncu, H. (2005). *Bayburt tüfünün (Bayburt taşı) fiziksel, mekanik ve petrografik özellikleri*. Ankara, Türkiye: TMMOB Maden Mühendisleri Odası Yayınları.
- Yılmaz, D. (2018). *Tekstil boyar maddelerinin elektrokimyasal ve spektroskopik karakterizasyonu* (Yüksek lisans tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No.496283)
- Yılmaz, S. C. (2024). *Nevşehir bölgesi pomzası ve pirinç kabuğu külünün hafif beton üretiminde kullanılabilirliğinin araştırılması* (Yüksek lisans tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 856265)
- Zakzeski, J., Bruijninx, P. C. A., Jongerius, A. L., & Weckhuysen, B. M. (2010). The catalytic valorization of lignin for the production of renewable chemicals. *Chemical Reviews*, 110(6), 3552-3599. <https://doi.org/10.1021/cr900354u>

## ÖZ GEÇMİŞ

Ömer BAYRAK ilk ve orta eğitimini Erzincan'da tamamladı, 2002 yılında Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Yapı Eğitimi Bölümünden mezun oldu. 2011 yılında KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı Tezli Yüksek Lisans programını tamamladı. 2011 yılında Bayburt Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümünde Öğretim Görevlisi olarak göreve başladı ve halen bu görevini sürdürmektedir.

