

**T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**POMZA TOZU VE PORSELEN PARLATMA ATIĞININ ULTRA YÜKSEK  
PERFORMANSLI BETONLARDA PUZOLANİK MALZEME OLARAK  
KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Mukhtar OSMANOV**

**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

**İnşaat Mühendisliği Bilim Dalı**

**TEMMUZ 2024**



**T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**POMZA TOZU VE PORSELEN PARLATMA ATIĞININ ULTRA YÜKSEK  
PERFORMANSLI BETONLARDA PUZOLANİK MALZEME OLARAK  
KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Mukhtar OSMANOV**

**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

**İnşaat Mühendisliği Bilim Dalı**

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Mehmet EMİROĞLU**

**Eş Danışmanı: Dr. Ana Mafalda MATOS**

**TEMMUZ 2024**



Mukhtar OSMANOV tarafından hazırlanan “Pomza Tozu Ve Porselen Parlatma Atığının Ultra Yüksek Performanslı Betonlarda Puzolanik Malzeme Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması” adlı tez çalışması 16.07.2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği/oy çokluğu ile Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı İnşaat Mühendisliği Bilim Dalı’nda Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

### Tez Jürisi

**Jüri Başkanı :** **Prof. Dr. Mehmet EMİROĞLU** (Danışman) .....  
Sakarya Üniversitesi

**Jüri Üyesi :** **Dr. Öğr. Üyesi Zeki ÖZCAN** .....  
Sakarya Üniversitesi

**Jüri Üyesi:** **Prof. Dr. Serkan SUBAŞI** .....  
Düzce Üniversitesi



## **ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ**

Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Eğitim-Öğretim Yönetmeliğine ve Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesine uygun olarak hazırlamış olduğum “POMZA TOZU VE PORSELEN PARLATMA ATIĞININ ULTRA YÜKSEK PERFORMANSLI BETONLARDA PUZOLANİK MALZEME OLARAK KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI” başlıklı tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın tüm aşamalarında yukarıda belirtilen yönetmelik ve yönergeye uygun davrandığımı, tezin içerdiği yenilik ve sonuçları başka bir yerden almadığımı, tezde kullandığım eserleri usulüne göre kaynak olarak gösterdiğimi, bu tezi başka bir bilim kuruluna akademik amaç ve unvan almak amacıyla vermediğimi ve 20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince Sakarya Üniversitesi’nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Enstitü tarafından belirlenmiş ölçütlere uygun rapor alındığını, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun ortaya çıkması halinde doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi beyan ederim.

(16/07/2024).

Mukhtar OSMANOV





*Aileme,*



## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca yardımlarını esirgemeyen, danışman hocamlarım Prof. Dr. Mehmet EMİROĞLU'na ve Dr. Ana Mafalda MATOS'a teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışmamın gerçekleşmesinde verdikleri destek ve katkılar için başta Fibrobeton Yönetim Kurulu Üyesi Muhammed MARAŞLI'ya, Ar-Ge Laboratuvar Şefi Volkan ÖZDAL ve ekibine; özellikle Fibrobeton Ar-Ge Merkezi'nde Doktora Sonrası Araştırmacı olarak görev yapan Dr. Doğu RAMAZANOĞLU ve Ar-Ge Mühendisi Seren TÜMKAYA'ya destekleri ve emekleri için içtenlikle teşekkürlerimi sunarım.

Mukhtar OSMANOV



## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

|                                                                                     |       |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ .....                                   | v     |
| TEŞEKKÜR .....                                                                      | ix    |
| İÇİNDEKİLER .....                                                                   | xi    |
| KISALTMALAR .....                                                                   | xiii  |
| SİMGELER .....                                                                      | xv    |
| TABLO LİSTESİ .....                                                                 | xvii  |
| ŞEKİL LİSTESİ .....                                                                 | xix   |
| ÖZET .....                                                                          | xxi   |
| SUMMARY .....                                                                       | xxiii |
| 1. GİRİŞ .....                                                                      | 1     |
| 1.1. Pozolanik Malzemelere Giriş .....                                              | 4     |
| 1.1.1. Pozolanik malzemelerin beton teknolojisindeki önemi .....                    | 5     |
| 1.1.2. Betonda pozolanik malzeme kullanmanın avantajları .....                      | 6     |
| 1.2. Ultra Yüksek Performanslı Betona (UYPB) Genel Bakış .....                      | 7     |
| 1.2.1. UYPB'nin özellikleri .....                                                   | 8     |
| 1.2.2. UYPB karışımlarında pozolan kullanılmasının önemi .....                      | 8     |
| 1.2.3. İnce öğütülmüş pomza ve porselen parlatma atığı tozunun özellikleri .....    | 9     |
| 1.3. Önceki Çalışmalar .....                                                        | 10    |
| 1.4. Literatür Boşluğu ve Gerekçesi .....                                           | 16    |
| 2. MATERYAL VE METOT .....                                                          | 19    |
| 2.1. Materyal .....                                                                 | 19    |
| 2.1.1. Bağlayıcılar .....                                                           | 19    |
| 2.1.2. Agregalar .....                                                              | 23    |
| 2.1.3. Çelik lifler .....                                                           | 23    |
| 2.1.4. Akışkanlaştırıcı .....                                                       | 24    |
| 2.2. Metot .....                                                                    | 25    |
| 2.2.1. UYPB numunelerinin hazırlanması .....                                        | 26    |
| 2.2.2. Pomza ve porselen parlatma atığı tozu için özgül ağırlık deneyi .....        | 29    |
| 2.2.3. Taze beton deneyleri .....                                                   | 30    |
| 2.2.3.1. Taze beton yayılma çapı deneyi .....                                       | 30    |
| 2.2.3.2. Taze beton yoğunluğu deneyi .....                                          | 31    |
| 2.2.3.3. Reolojik Deneyi .....                                                      | 32    |
| 2.2.4. Sertleşmiş beton deneyleri .....                                             | 35    |
| 2.2.4.1. Sertleşmiş beton yoğunluğu deneyi .....                                    | 35    |
| 2.2.4.2. Ultrases geçiş hızı (UGH) deneyi .....                                     | 36    |
| 2.2.4.3. Eğilme dayanımı deneyi .....                                               | 37    |
| 2.2.4.4. Basınç dayanımı deneyi .....                                               | 38    |
| 3. BULGULAR VE TARTIŞMA .....                                                       | 39    |
| 3.1. Hammadde Testleri .....                                                        | 39    |
| 3.1.1. Pomza ve porselen parlatma atığı tozunun pozolanik aktivite analizleri ..... | 39    |
| 3.2. Taze Beton Deneyleri .....                                                     | 40    |

|                                                          |           |
|----------------------------------------------------------|-----------|
| 3.2.1. Taze beton yoğunluğu .....                        | 40        |
| 3.2.2. Yayılma çapı .....                                | 42        |
| 3.2.3. Reolojik Deneyi.....                              | 43        |
| 3.2.3.1. Dinamik akma gerilimi ve plastik viskozite..... | 43        |
| 3.2.3.2. Tikotropi değeri .....                          | 44        |
| 3.3. Sertleşmiş Beton Testleri.....                      | 45        |
| 3.3.1. Sertleşmiş beton yoğunluğu .....                  | 45        |
| 3.3.2. Ultrases geğış hızı.....                          | 46        |
| 3.3.3. Eğilme dayanımı .....                             | 47        |
| 3.3.4. Basınç dayanımı .....                             | 49        |
| <b>4. SONUÇ VE ÖNERİLER.....</b>                         | <b>51</b> |
| <b>KAYNAKLAR.....</b>                                    | <b>53</b> |
| <b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>                                     | <b>65</b> |



## KISALTMALAR

|             |                                                         |
|-------------|---------------------------------------------------------|
| <b>AFS</b>  | : American Foundry Society, Amerikan Dökümcüler Derneği |
| <b>ASTM</b> | : The American Society for Testing and Materials        |
| <b>BD</b>   | : Basınç Dayanımı                                       |
| <b>Ç</b>    | : Çimento                                               |
| <b>ÇL</b>   | : Çelik Lif (Bekaert Lifi)                              |
| <b>DYK</b>  | : Doygun Kuru Yüzey                                     |
| <b>ED</b>   | : Eğilme Dayanımı                                       |
| <b>IPCC</b> | : Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli              |
| <b>MTK</b>  | : Metakaolin                                            |
| <b>NPÇ</b>  | : Normal Portland Çimentosu                             |
| <b>PPAT</b> | : Porselen Parlatma Atığı Tozu                          |
| <b>PT</b>   | : Pomza Tozu                                            |
| <b>Ref</b>  | : Referans                                              |
| <b>S/Ç</b>  | : Su/Çimento                                            |
| <b>SA</b>   | : Süper Akışkanlaştırıcı                                |
| <b>SD</b>   | : Silis Dumanı                                          |
| <b>SEM</b>  | : Taramalı Elektron Miroskobu                           |
| <b>SG</b>   | : Sera Gazı                                             |
| <b>SK</b>   | : Silis Kumu                                            |
| <b>SKAT</b> | : Seramik Karo Atık Tozu                                |
| <b>SPA</b>  | : Seramik Parlatma Atığı                                |
| <b>TÇM</b>  | : Tamamlayıcı Çimento Malzemeleri                       |
| <b>TGA</b>  | : Termogravimetrik Analiz                               |
| <b>TSE</b>  | : Türk Standartları Enstitüsü                           |
| <b>UGH</b>  | : Ultrasonik Geçiş Hızı                                 |
| <b>UK</b>   | : Uçucu Kül                                             |
| <b>UYPB</b> | : Ultra Yüksek Performanslı Beton                       |
| <b>VK</b>   | : Volkanik Kül                                          |
| <b>VPTK</b> | : Volkanik Pomza Toz Külü                               |
| <b>WMO</b>  | : Dünya Meteoroloji Örgütü                              |

**XRD** : X-Işını Difraktometresi, X Işını Kırınım Yöntemi  
**YÇD** : Yarmada Çekme Dayanımı  
**YYM** : Yanıt Yüzey Metodolojisi



## SİMGELER

|               |                                                              |
|---------------|--------------------------------------------------------------|
| $M_{(p+n)}$   | : Piknometre + Doygun Kuru Yüzey Numune Ağırlığı             |
| $M_{(p+n+s)}$ | : Piknometre + Numune+ Su Ağırlığı                           |
| $M_{kuru}$    | : Kuru Numune Ağırlığı                                       |
| $\delta_g$    | : Görünen Özgül Ağırlık                                      |
| $D$           | : Sertleşmiş betonun yoğunluğu ( $kg/m^3$ )                  |
| $M$           | : Numune kütlesi (kg)                                        |
| $V$           | : prizma numune hacmi ( $m^3$ )                              |
| $MPa$         | : Mega Paskal                                                |
| $N/mm^2$      | : Newton/milimetrekare                                       |
| $t$           | : Zaman (gün)                                                |
| $UGH$         | : Ultrases Geçiş Hızı                                        |
| $\mu m$       | : Mikrometre                                                 |
| $V$           | : Geçiş hızı, (m/s)                                          |
| $L$           | : Dönüştürücü yüzeylerinin merkezleri arasındaki mesafe, (m) |
| $T$           | : Geçiş süresi, (s)                                          |
| $R_c$         | : Basınç dayanımı (MPa)                                      |
| $F_c$         | : Kırılma Yüğü (N)                                           |
| $\tau$        | : Kayma Gerilme (Pa)                                         |
| $\tau_0$      | : Dinamik Akma Gerilme (Pa)                                  |
| $\gamma$      | : Kayma Hızı ( $s^{-1}$ )                                    |
| $A$           | : Tiksotropik Döngü Alanı                                    |
| $\eta$        | : Görünür Viskozite ( $Pa \cdot s$ )                         |
| $R_f$         | : Eğilme dayanımı (MPa)                                      |
| $b^3$         | : Kare yan kesitin ve prizmanın boyutu (mm)                  |
| $F_f$         | : Kırılma bölgesinde prizmanın merkezine uygulanan yük (N)   |
| $l$           | : Destekler arası mesafe (mm)                                |



## TABLO LİSTESİ

### Sayfa

|                                                                                                       |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tablo 2.1.</b> Çimentonun kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri. ....                          | 19 |
| <b>Tablo 2.2.</b> Silis dumanının fiziksel ve kimyasal özellikleri. ....                              | 20 |
| <b>Tablo 2.3.</b> Porselen parlatma atığı tozunun kimyasal bileşenleri. ....                          | 21 |
| <b>Tablo 2.4.</b> Porselen parlatma atığı tozu tane analizi. ....                                     | 21 |
| <b>Tablo 2.5.</b> Pomza tozunun kimyasal bileşenleri. ....                                            | 22 |
| <b>Tablo 2.6.</b> Pomza tozu tane analizi. ....                                                       | 23 |
| <b>Tablo 2.7.</b> Silis kumu kimyasal bileşenleri. ....                                               | 23 |
| <b>Tablo 2.8.</b> Çelik lifin özellikleri. ....                                                       | 24 |
| <b>Tablo 2.9.</b> Süper akışkanlaştırıcının özellikleri. ....                                         | 25 |
| <b>Tablo 2.10.</b> UYPB karışımlarının bir metreküpteki karışım içerikleri (kg/m <sup>3</sup> ). .... | 27 |
| <b>Tablo 2.11.</b> Pomza ve porselen parlatma atığı tozunun özgül ağırlıkları. ....                   | 30 |



## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

|                                                                                                                             |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 1.1. Normal beton (a); UYPB (b). ....                                                                                 | 1  |
| Şekil 1.2. Pomza tozu. ....                                                                                                 | 3  |
| Şekil 2.1. Çimento (a); silis dumanı (b). ....                                                                              | 19 |
| Şekil 2.2. Çimento ve silis dumanı tane boyutu analizi. ....                                                                | 20 |
| Şekil 2.3. Porselen parlatma atığı tozu. ....                                                                               | 21 |
| Şekil 2.4. Porselen parlatma atık tozu tane boyut analizi. ....                                                             | 21 |
| Şekil 2.5. Pomza tozu. ....                                                                                                 | 22 |
| Şekil 2.6. Pomza tozu tane boyut analizi. ....                                                                              | 22 |
| Şekil 2.7. Silis kumu. ....                                                                                                 | 23 |
| Şekil 2.8. Çelik lifler. ....                                                                                               | 24 |
| Şekil 2.9. Süper akışkanlaştırıcı. ....                                                                                     | 24 |
| Şekil 2.10. İş akış şeması. ....                                                                                            | 25 |
| Şekil 2.11. Mastersizer 3000. ....                                                                                          | 26 |
| Şekil 2.12. UYPB numunelerinin hazırlandığı mikser. ....                                                                    | 27 |
| Şekil 2.13. UYPB harçlarının hazırlanması. ....                                                                             | 28 |
| Şekil 2.14. Üretilen UYPB numuneleri. ....                                                                                  | 29 |
| Şekil 2.15. Özgür ağırlık deneyinin yapılışı. ....                                                                          | 30 |
| Şekil 2.16. Taze beton yayılma çapı. ....                                                                                   | 31 |
| Şekil 2.17. 1 dm <sup>3</sup> 'lük kap. ....                                                                                | 31 |
| Şekil 2.18. RSX SST Reometre cihazı. ....                                                                                   | 32 |
| Şekil 2.19. Dinamik akma gerilmesi. ....                                                                                    | 33 |
| Şekil 2.20. Histeretik döngü alanı yöntemi. ....                                                                            | 34 |
| Şekil 2.21. UYPB numunelerinin ağırlık ve boyut ölçümleri. ....                                                             | 36 |
| Şekil 2.22. Ultrases geçiş hızı ölçümü. ....                                                                                | 36 |
| Şekil 2.23. Eğilme dayanım deneyi. ....                                                                                     | 37 |
| Şekil 2.24. Basınç dayanım deneyi. ....                                                                                     | 38 |
| Şekil 3.1. Basınç dayanım deneyi. ....                                                                                      | 39 |
| Şekil 3.2. Porselen parlatma atığı tozunun puzolanik aktivitesi. ....                                                       | 40 |
| Şekil 3.3. Taze beton yoğunluğu. ....                                                                                       | 41 |
| Şekil 3.4. Yayılma çapı testi. ....                                                                                         | 42 |
| Şekil 3.5. Pomza tozu içeren taze beton numunelerinin dinamik akma gerilim ve plastik vizskoziteleri. ....                  | 43 |
| Şekil 3.6. Porselen parlatma atığı tozu içeren taze beton numunelerinin dinamik akma gerilim ve plastik viskoziteleri. .... | 43 |
| Şekil 3.7. PT ve PPAT ikameli taze beton numunelerinin tiksotropik davranışları. ....                                       | 45 |
| Şekil 3.8. Sertleşmiş beton yoğunluk değerleri. ....                                                                        | 46 |
| Şekil 3.9. Ultrases geçiş hızı. ....                                                                                        | 47 |
| Şekil 3.10. Eğilme dayanımı. ....                                                                                           | 48 |
| Şekil 3.11. Basınç dayanımı. ....                                                                                           | 49 |



## **POMZA TOZU VE PORSELEN PARLATMA ATIĞININ ULTRA YÜKSEK PERFORMANSLI BETONLARDA PUZOLANİK MALZEME OLARAK KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI**

### **ÖZET**

Bu çalışma, ultra yüksek performanslı beton (UYPB) üretiminde maliyetli silis dumanının (SD) yerini alabilecek alternatif malzemeleri araştırmaktadır. UYPB, yüksek basınç dayanımı ve ileri fiziksel özellikleri ile karakterize edilen bir inşaat malzemesidir ve tipik olarak çimento ile birlikte SD içermektedir. Ancak, SD'nin yüksek maliyeti UYPB üretimini pahalı hale getirmekte, ekonomik alternatiflerin gerekliliğini ortaya koymaktadır. Bu nedenle, araştırma, SD yerine geçebilecek yerel ve daha uygun maliyetli malzemeleri keşfetmeyi amaçlamaktadır.

Bu çalışmada, SD'ye potansiyel alternatif olarak ince öğütülmüş pomza tozu (PT) ve porselen parlatma atığı tozu (PPAT) gibi puzolanik malzemeler incelenmiştir. Özellikle SD'nin bulunmadığı veya temin edilmesinin maliyetli olduğu bölgelerde bu yerel alternatiflerin UYPB karışımlarındaki uygulanabilirliğine odaklanılmıştır. Araştırma, SD'nin çeşitli oranlarda PT ve PPAT ile değiştirilerek hazırlanan UYPB karışımlarının mekanik ve fiziksel özelliklerinin ayrıntılı bir değerlendirmesini içermektedir. Metodoloji, taze UYPB karışımlarının yayılma çapı, taze beton yoğunluğu ve reolojik özelliklerinin değerlendirilmesini içermektedir. Sertleşmiş beton için, 7, 14 ve 28. günlerde yoğunluk, ultrases geçiş hızı, eğilme dayanımı ve basınç dayanımı gibi fiziksel ve mekanik özellikler test edilmiştir. Bu testler, farklı malzeme kombinasyonlarının beton performansı üzerindeki etkilerini değerlendirmek amacıyla yapılmıştır. Sonuçlar, hem pomza tozunun (PT) hem de porselen parlatma atığı tozunun (PPAT) puzolanik aktivite sergilediğini ve PT40, PT50 ve PPAT40 gibi karışımların mükemmel mekanik özellikleri koruyarak malzemenin dayanım ve dayanıklılığında ödün vermeden üretilebileceğini göstermektedir. Ayrıca, bu alternatif malzemelerin kullanımı, UYPB üretiminin maliyet etkin şekilde optimize edilmesini ve SD tüketiminin azaltılmasını sağlamaktadır. Araştırma, bu yerel alternatiflerin, SD temininde zorluk yaşayan bölgelerde yaygın olarak kullanılabileceğini ve sürdürülebilir inşaat malzemelerinin geliştirilmesi yönünde önemli bir adım olduğunu ortaya koymaktadır. Bu bulgular, inşaat sektöründe ekonomik ve çevresel faydalar sağlayabilecek yenilikçi yaklaşımlar sunmaktadır. Sonuçlar, çevre dostu inşaat malzemelerinin geliştirilmesine yönelik araştırmalara katkıda bulunmakta ve beton endüstrisinin geleceği için önemli stratejiler sunmaktadır. Ayrıca, daha düşük maliyetli ve yerel olarak temin edilebilen malzemelerin kullanımı, inşaat sektörünün sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmasına yardımcı olmaktadır.

Sonuç olarak, bu çalışma, UYPB üretiminde silis dumanının yerini alabilecek ince öğütülmüş pomza tozu ve porselen parlatma atığı tozunun etkin birer alternatif olduğunu vurgulamaktadır. Bulgular, inşaat sektöründe sürdürülebilir ve maliyet etkin alternatiflerin geliştirilmesinin önemini ortaya koymakta, bu sayede performansın artırılabilirliğini ve çevresel etkinin azaltılabileceğini göstermektedir. Bu araştırma,

sadece ekonomik kaygılara yanıt vermekle kalmayıp, aynı zamanda endüstriyel yan ürünlerin kullanımını teşvik ederek beton üretiminde daha sürdürülebilir bir yaklaşımı desteklemektedir.



# **INVESTIGATION OF THE USE OF PUMICE POWDER AND PORCELAIN POLISHING WASTE AS POZZOLANIC MATERIAL IN ULTRA HIGH PERFORMANCE CONCRETE**

## **SUMMARY**

This study focuses on investigating alternative materials that can effectively replace the costly silica fume (SD) in the production of ultra high performance concrete (UYPB). UYPB is a highly advanced construction material renowned for its exceptional compressive strength and superior physical properties, which make it suitable for a wide range of demanding applications in the construction industry. Typically, UYPB formulations incorporate SD in conjunction with cement to enhance the material's performance characteristics, including durability, workability, and resistance to environmental factors.

However, the high cost associated with SD significantly increases the overall expense of UYPB production, which can be a limiting factor for its widespread adoption, particularly in regions where budget constraints are critical. Consequently, the search for economical alternatives to SD is not only important but also urgent, as it can facilitate the broader use of UYPB in various construction projects.

In light of these considerations, this research aims to explore locally available and more affordable materials that can serve as effective substitutes for SD. Specifically, the study examines finely ground pumice powder (PT) and porcelain polishing waste powder (PPAT) as potential alternatives. Pumice is a naturally occurring volcanic rock that possesses pozzolanic properties, which can enhance the performance of concrete mixtures. Similarly, porcelain polishing waste, a by-product of the porcelain manufacturing process, is rich in silica and can contribute to the pozzolanic activity of concrete.

By investigating these alternative materials, the study seeks to evaluate their feasibility in UYPB formulations, aiming to maintain or even improve the mechanical and physical properties of the concrete while reducing production costs. This research not only addresses the economic challenges associated with UYPB production but also promotes the use of sustainable materials that can contribute to environmental conservation by utilizing industrial by-products. Ultimately, the findings of this study could pave the way for more cost-effective and sustainable practices in the concrete industry, enhancing the accessibility and applicability of UYPB in various construction contexts.

### **Research Methodology**

In our study, ultra high performance concrete (UYPB) mixtures were meticulously prepared by substituting silica fume (SD) with varying proportions of finely ground pumice powder (PT) and porcelain polishing waste powder (PPAT). This substitution aimed to explore the potential of these alternative materials to maintain or enhance the performance characteristics of UYPB while reducing production costs.

To achieve a comprehensive understanding of the impact of these substitutions, the mechanical and physical properties of the resulting UYPB mixtures were thoroughly evaluated. The assessment of fresh UYPB mixtures included several critical parameters. Specifically, we measured the spread diameter, which is an indicator of workability, and the fresh concrete density, which provides insights into the material's composition and potential strength. Additionally, we examined the rheological properties of the mixtures, as these characteristics are crucial for ensuring proper flow and placement during the pouring process.

For the evaluation of hardened concrete, a series of tests were conducted at specified intervals—namely on days 7, 14, and 28 post-mixing. These tests included measurements of density, which helps to assess the compactness of the concrete; ultrasonic pulse velocity, which serves as a non-destructive method to evaluate the quality and integrity of the concrete; and both flexural strength and compressive strength, which are essential indicators of the material's load-bearing capacity and durability.

The primary objective of these tests was to evaluate the effects of different material combinations on the overall performance of the concrete. By systematically analyzing the results, we aimed to determine how the incorporation of PT and PPAT as substitutes for SD influenced the mechanical properties of UYPB.

Particularly noteworthy is the significance of rheological properties in fresh concrete, as they directly affect the ease of placement and the quality of the finished product. Therefore, parameters such as spread diameter and viscosity were meticulously measured to ensure that the mixtures not only met performance standards but also facilitated efficient handling and application on construction sites. This comprehensive evaluation process is crucial for understanding the viability of using PT and PPAT in UYPB formulations, paving the way for more sustainable and cost-effective concrete solutions.

## Results and Discussion

The results of our comprehensive investigation into the use of pumice powder (PT) and porcelain polishing waste powder (PPAT) as partial replacements for silica fume (SD) in Ultra High Performance Concrete (UYPB) production were highly encouraging. Both PT and PPAT exhibited pronounced pozzolanic activity, a crucial characteristic that enables these materials to actively participate in the chemical reactions within concrete and contribute to its strength development.

The pozzolanic nature of PT and PPAT allowed for the formulation of UYPB mixtures, such as PT40, PT50, and PPAT40, where 40% or 50% of the SD content was replaced by these alternative materials. Remarkably, these mixtures maintained excellent mechanical properties, including compressive and flexural strength, without compromising the overall strength and durability of the concrete. This finding is particularly significant as it demonstrates the potential of PT and PPAT to serve as effective partial substitutes for SD in UYPB production.

As the replacement ratio of PT and PPAT increased in the UYPB mixtures, certain changes were observed in the fresh concrete properties. Specifically, the density and spread characteristics of the fresh concrete samples were affected, with a general trend of decreasing density and spread diameter as the replacement ratio increased. This observation was particularly pronounced in samples containing 10% PT and PPAT,

which displayed a significant reduction in density compared to the reference UYPB mixture.

However, the most notable finding was that substituting PT and PPAT at 40% and 50% ratios resulted in significantly higher compressive strengths on days 7, 14, and 28 compared to the reference UYPB mixture. This remarkable improvement in compressive strength can be attributed to the pozzolanic activity of PT and PPAT, which positively influences the chemical reactions within the concrete, leading to enhanced strength development.

Similar trends were observed in the flexural strength results, where the PT40, PT50, and PPAT40 mixtures consistently outperformed the reference UYPB on days 7, 14, and 28. However, it is important to note that a 50% addition of PPAT led to a decrease in flexural strength values over the same periods. This finding suggests that while PT and PPAT can effectively serve as partial replacements for SD in UYPB production, the optimal replacement ratio may vary depending on the specific properties being targeted.

Overall, these results clearly demonstrate the potential of pumice powder and porcelain polishing waste powder to enhance the performance of ultra high performance concrete. By leveraging the pozzolanic activity of these alternative materials, it is possible to produce UYPB mixtures with improved mechanical properties while reducing the reliance on costly and resource-intensive materials like silica fume. These findings open up new avenues for the development of more sustainable and cost-effective UYPB solutions, contributing to the advancement of the construction industry.

#### Rheological Properties

The study also investigated the effects of yield stress and plastic viscosity on the rheological properties of fresh concrete. The substitution of PT and PPAT significantly influenced the thixotropic behavior of the mixtures. An increase in PT substitution correlated with higher thixotropic values, although a tendency to decrease was observed at a 50% replacement ratio. Similarly, PPAT substitution enhanced thixotropic behavior, reaching its peak value at a 50% replacement ratio. These additives can improve the rheological properties of fresh concrete; however, careful optimization of the substitution ratios is necessary. The importance of rheological properties during the pouring and processing of concrete is emphasized, as suitable rheological characteristics facilitate the placement and compaction of concrete.

#### Environmental Sustainability

The findings also highlight the environmental sustainability benefits of using these materials. Pozzolans can contribute to reducing environmental impacts by reusing industrial waste in concrete production. Specifically, the utilization of industrial by-products like porcelain polishing waste offers an innovative solution to waste management issues. The use of PT and PPAT can contribute to a greener concrete production process by reducing the carbon footprint. This represents a significant step towards sustainable construction practices, while also aiding in the conservation of natural resources.

#### Future Research Directions

Future research could explore the effects of these materials on different types of concrete, contributing to broader applications in the construction industry.

Investigating the early-age (0-28 days) and later-age (56-365 days) effects of both pumice powder and porcelain polishing waste powder on the strength development of ultra high performance concretes will be essential for promoting their use. Additionally, studies on the long-term performance and durability characteristics of PT and PPAT will help in gaining wider acceptance and adoption of these materials. Such research could provide insights into the potential chemical and physical changes these materials undergo, enhancing our understanding of their long-term performance in UYPB. Examining the behavior of these materials under various environmental and climatic conditions is also crucial.

## Conclusion

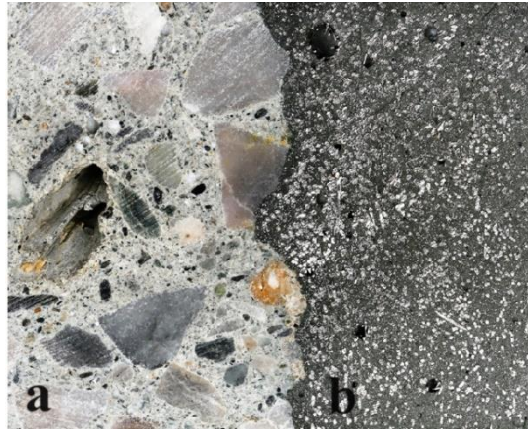
In conclusion, pozzolanic activity is a vital process that enhances the mechanical properties of construction materials. This study established that both pumice powder (PT) and porcelain polishing waste powder (PPAT) exhibit pozzolanic activity and can be effectively used as binders in concrete mixtures. As the replacement ratio of PT and PPAT in UYPB increased, the density and spread characteristics of fresh concrete samples were affected, generally showing a decrease in density and spread diameter. The substitution of PT and PPAT at 40% and 50% ratios yielded higher compressive strengths on days 7, 14, and 28 compared to the reference UYPB, although a decrease in flexural strength was noted with 50% PPAT. These results demonstrate the potential of PT and PPAT as effective binders in UYPB production, enhancing concrete performance while promoting cost-effectiveness and environmental sustainability.

## 1. GİRİŞ

Modern yapı sektöründe, yapı malzemelerinin dayanıklılığı, mukavemeti ve çevre dostu pozitif etkileri önem arz etmektedir. Bu açıdan, ultra yüksek performanslı betonlar (UYPB), inşaat mühendisliği alanında önemli bir gelişme ve araştırma konusu olmuştur. UYPB, olağanüstü mekanik özellikleri, yüksek dayanıklılığı ve estetik potansiyeli ile modern mimari tasarımların vazgeçilmez bir bileşeni haline gelmiştir.

UYPB, diğer beton türlerine kıyasla (Ullah ve ark, 2022) üstün mekanik ve dayanıklılık özelliklerine sahip yüksek teknoloji bir çimento esaslı malzemedir (Şekil 1.1.a) (Tai & El-Tawil, 2017). Mikro-çimentolu malzemelerin dahil edilmesi ve su-çimentolu malzeme oranını azaltmak için süperakışkanlaştırıcı kullanılması ile karakterize edilir (Marvila ve ark., 2021), bu da son derece düşük gözeneklilik ve geçirgenlik ile sonuçlanır (Şekil 1.1.b) (Ramazanoğlu, 2023a; Tai & El-Tawil, 2017).

UYPB, tipik olarak portland çimentosu, silis dumanı, kuvars tozu, silis kumu, yüksek oranda su azaltıcı süperakışkanlaştırıcılar ve muhtemelen çelik lif içerir (Marvila ve ark, 2021). Lif ilavesi malzemenin sünekliğini, tokluğunu, gerilme ve eğilme kapasitesini artırır (Marvila ve ark, 2021). UYPB, baraj onarımları, köprü tabliye kaplamaları, yüksek binalardaki bağlantı kirişleri, yaya köprüleri, tünel astar segmentleri ve özel yapılar gibi çeşitli alanlarda başarıyla gerçekleştirilmiştir (Marvila ve ark, 2021; Ramazanoğlu, 2023b).



Şekil 1.1. Normal beton (a); UYPB (b).

Silis dumanı gibi puzolanik malzemeler, UYPB'nin performansında çok önemli bir rol oynar. Silis dumanı, çimento hidrasyonunda oluşan kalsiyum hidroksit ile tepkime vererek kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) jeli oluşturan ve UYPB'nin mukavemetini artıran puzolanik bir malzemedir (Ullah ve ark., 2022). UYPB'de puzolanik malzemelerin kullanımı, gerekli çimento miktarını azaltabilir ve bu da CO<sub>2</sub> emisyonlarının azalması nedeniyle daha düşük çevresel etkiye yol açabilir (Ullah ve ark, 2022).

Ayrıca, uçucu kül, doğal puzolanlar ve öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu (ÖYFC) gibi diğer puzolanik malzemeler de UYPB'de kullanılabilir (Ullah ve ark, 2022). Bu malzemeler UYPB'deki çimentonun bir kısmının yerini alarak performansını ve sürdürülebilirliğini artırabilir (Ullah ve ark, 2022). Örneğin, doğal bir puzolan olan metakaolin, önemli bir mukavemet kaybı olmadan uçucu külün yerini alabilir ve hatta don direnci ve klorür geçirgenliği gibi dayanıklılık özelliklerini iyileştirebilir (Gonzales ve ark., 2023).

Puzolanik malzemelerin kullanımı da dahil olmak üzere UYPB karışımlarının optimizasyonu, yüksek basınç dayanımına ve minimum çimento içeriği gereksinimine sahip yüksek akışlı karışımlarla sonuçlanabilir (Abellán ve ark, 2020). Bu, beton üretiminin çevresel etkisini azaltırken performansını koruduğu ve hatta geliştirdiği için sürdürülebilir inşaat açısından özellikle önemlidir.

Çimento kullanımının azaltılması ve alternatif malzemelerin araştırılması, çevre dostu ve ekonomik açıdan sürdürülebilir yapı malzemelerinin geliştirilmesi için önemli bir adımdır. Bu kapsamda, silis dumanı yerine ince öğütülmüş pomza tozu ve seramik parlatma atığı tozunun puzolanik malzeme olarak kullanılabilirliği araştırılmaktadır (X. Li ve ark, 2023a; Pang ve ark, 2023; Xiong ve ark, 2021).

Pomza tozunun (PT) (Şekil 1.2) (Bakis, 2019) çimento endüstrisinde doğal bir puzolanik malzeme olarak gelecek vaat etmektedir. Çalışmalar, belirli oranlarda eklendiğinde çimento karışımlarının ve yüksek mukavemetli betonun mukavemetini artırabileceğini göstermektedir (Alqarni, 2022; Elyasigorji ve ark, 2023; Tanyildizi, 2022). Pomzanın puzolanik aktivitesi 28 günlük kürlenmeden sonra çimento karışımlarının mukavemetinde bir artışa neden olması yoluyla gösterilmiştir (Tanyildizi, 2022).

Porselen parlatma atığı (PPA), seramik atıklarının büyük bir kısmını oluşturmaktadır. Parlatma atığı çamuru, aşınmış seramik yüzeyi ve aşınmış zımpara atıklarından meydana gelmektedir. Genellikle, bu atıklar parlatma disklerinden gelen ağırlıkça %1-5 SiC aşındırıcı ve %2-6 magnezyum oksiklorit yapıştırıcı empüriteleri içermektedir (Kirsever & Toplan, 2019).

Öte yandan, porselen parlatma atığı tozunun da ince öğütüldüğünde puzolanik özelliklere sahip olduğu bulunmuştur. İnce öğütülmüş tuğla tozu ile yapılan çimento karışımlarının özellikleri ve performansı, atığın bileşimine ve ikame seviyesine bağlıdır. Tuğla tozu erken yaşlarda bir dolgu maddesi gibi davranır, ancak hidrasyon ilerlediğinde, puzolanik aktivitesi kısmen kalsiyum hidroksit tüketir ve hidratlı kalsiyum alüminatların oluşumunu teşvik eder (L. Li ve ark, 2024; L. G. Li ve ark, 2019; X. Li ve ark, 2023b; Wang ve ark, 2023; Xiong ve ark, 2021). Pişmiş tuğla tozu ile harmanlanmış çimentolar erken yaşlarda düşük basınç dayanımına sahiptir, ancak daha sonraki yaşlarda karşılaştırılabilir dayanım sınıfına sahiptir (Rahhal ve ark, 2019).

Özetle hem pomza tozu hem de ince öğütülmüş porselen parlatma atığı tozu puzolanik özelliklere sahiptir ve belirli oranlarda eklendiğinde çimento karışımlarının ve yüksek dayanımlı betonun mukavemetini artırabilir. Pomzanın ısıtma işlemi puzolanik aktivitesini önemli ölçüde etkileyebilir ve tuğla tozu erken yaşlarda bir dolgu maddesi gibi davranır, ancak puzolanik aktivitesi aktive edildiğinde hidratlı kalsiyum alüminat oluşumunu teşvik eder.



**Şekil 1.2.** Pomza tozu.

Bu tezin kapsamı, pomza ve porselen parlatma atığı tozunun UYPB, silis dumanının kısmi ikamesi olarak incelenmesi ve puzolanik özelliklerinin değerlendirilmesidir. Bu malzemelerin kaynakları ve özellikleri tespit edilmiş, hazırlanmaları laboratuvar

ortamında gerçekleştirilmiş ve ardından standartlaştırılmış test prosedürleriyle karakterize edilmiştir. Malzemelerin puzolanik potansiyelini değerlendirmek için reaktivite testleri, kimyasal analizler ve termal analizler dahil olmak üzere ASTM standartlarıyla uyumlu test protokolleri kullanılmıştır. Puzolanik malzemelerin UYPB'nin performansını artırmadaki etkinliğini değerlendirmek için farklı oranlarda pomza tozu ve porselen parlatma atığı tozu içeren çeşitli UYPB karışımları formüle edilmiş ve hazırlanmıştır. Bu karışımların değerlendirilmesi, yerleşik test metodolojileri kullanılarak basınç dayanımı, eğilme dayanımı, yoğunluk ve ultrases geçiş hızı gibi bir dizi fiziksel ve mekanik özelliğini kapsamaktadır.

UYPB, yüksek dayanıklılık, üstün mekanik özellikler ve karmaşık mimari tasarımlara uyarlanabilirlik gibi olağanüstü nitelikleri sayesinde inşaat sektöründe öne çıkan bir tercih konumdadır. Bununla birlikte, kaynak bulma uygulamalarının sürdürülebilirliği ve UYPB üretiminde kullanılan malzemelerle ilişkili çevresel sonuçlara ilişkin endişeler devam etmektedir. Puzolanik maddeler, çimento yerine kullanıldığında, çevresel ayak izlerini azaltırken beton dayanıklılığını artırma potansiyeli sergilemektedir. Sonuç olarak, puzolanik malzemelerin UYPB'deki uygulanabilirliğinin araştırılması bilimsel söylemde büyük önem taşımaktadır. Bu çalışma, ince öğütülmüş pomza ve porselen parlatma atığı tozunun puzolanik maddeler olarak uygulanabilirliğini incelemeye çalışmaktadır. Pomza ve porselen parlatma atığı tozlarının UYPB formülasyonlarına entegre edildiğinde performans özelliklerini değerlendirmek için bir dizi farklı deney yapılmıştır. Elde edilen bulguların, UYPB üretim süreçlerinde silis dumanına kıyasla alternatif ya da destekleyici puzolanik malzeme olarak kullanılabilirliğinin araştırılması amaçlanmıştır.

### **1.1. Puzolanik Malzemelere Giriş**

Puzolanik malzemeler, çimentonun hidrasyon ürünleri, özellikle de kalsiyum hidroksit ile reaksiyona girerek çeşitli hidrasyon bileşikleri oluşturabilen alümin silikat cam fazları içeren maddelerdir. Bu malzemeler, ince öğütüldüğünde sulu ortamda kalsiyum hidroksit ile tepkime vererek çimentolu bileşikler oluştururlar. Silisli-alümina bileşenleri, kalsiyum hidroksit, silis ve su arasındaki gerçekleşen reaksiyonlar puzolanik reaksiyon olarak bilinir. Esasen, puzolanik malzemeler çimento ile birleştirildiklerinde çimentolu özellikleri sayesinde betonun

mukavemetine ve dayanıklılığına katkıda bulunarak betonun özelliklerinin geliştirilmesine yardımcı olur (Jiang ve ark, 2024; Mahajan & Muhammad, 2024).

#### **1.1.1. Pozolanik malzemelerin beton teknolojisindeki önemi**

Pozolanik malzemelerin bağlayıcı etkileri ya çok azdır ya da hiç olmayan geniş bir silisli ve alüminli madde sınıfıdır. Bununla birlikte, ince bir şekilde bölündüklerinde ve su varlığında, normal sıcaklıklarda  $\text{Ca(OH)}_2$  ile tepkime vererek yapısal bağ oluştururlar. Bu reaksiyon pozolanik reaksiyon olarak bilinir. Pozolanik malzemeler, betonun mukavemetine ve dayanıklılığına katkıda bulunarak betonun özelliklerini geliştirmek için beton teknolojisinde tamamlayıcı çimentolu malzemeler (TÇM'ler) olarak kullanılır (Tayeh ve ark, 2022).

Günümüzde en yaygın olarak kullanılan pozolanlar, uçucu kül, silikon eritme işleminden elde edilen silis dumanı, yüksek derecede reaktif metakaolin ve pirinç kabuğu külü gibi silika bakımından zengin yanmış organik madde kalıntıları gibi endüstriyel yan ürünlerdir. Bu materyaller birçok ülkede sıkı bir şekilde oluşturulmuş ve düzenlenmiştir. Ancak yüksek kaliteli pozolanik yan ürünlerin tedariği sınırlıdır ve birçok yerel kaynak halihazırda tam olarak kullanılmaktadır. Volkanik kökenli kayalar, tortul kil ve şeyller gibi doğal pozolanlar da belirli yerlerde bol miktarda bulunur ve Almanya, Yunanistan ve Çin gibi ülkelerde Portland çimentosuna katkı olarak yaygın şekilde kullanılır (Tayeh ve ark, 2022).

Çimento ve betonda pozolan kullanımının faydaları üç yönlüdür. Birincisi, Portland çimentosunun önemli bir kısmının daha ucuz doğal pozolanlar veya endüstriyel yan ürünlerle değiştirilmesiyle elde edilen ekonomik kazançtır. İkincisi, Portland çimentosu üretimi sırasında yayılan sera gazlarıyla bağlantılı olarak harmanlanmış çimentonun çevresel maliyetinde bir azalma vardır. Son olarak, son ürünün dayanıklılığı artar. Pozolanların portland çimentosu ile harmanlanması, geleneksel üretim sürecine sınırlı bir müdahalede bulunur ve daha sürdürülebilir inşaat malzemeleri üretmenin bir yolunu sunar (Maaze & Shrivastava, 2023; Tayeh ve ark, 2022).

Özet olarak pozolanik malzemeler, su varlığında kalsiyum hidroksit ile reaksiyona girerek çimentolu bileşikler oluşturan silisli ve alüminli maddelerdir. Binlerce yıldır betonun özelliklerini geliştirmek için kullanılmışlardır ve mukavemeti artırma,

dayanıklılığı artırma ve çevresel etkiyi azaltma yetenekleri nedeniyle günümüzde yaygın olarak kullanılmaya devam etmektedirler.

### **1.1.2. Betonda puzolanik malzeme kullanmanın avantajları**

Betondaki puzolanik malzemeler: Artan işlenebilirlik: Betonda katkı maddesi olarak kullanılan puzolan, daha az miktarda su ile işlenebilirliği artırabilir, betonun yerleştirilmesini ve sıkıştırılmasını kolaylaştırır (Hamada, ve ark, 2023).

1. Azaltılmış geçirgenlik: Puzolanik malzemeler geçirgenliği azaltarak betonu tuzlar ve sülfatlar gibi zararlı maddelerin girişine karşı daha dayanıklı hale getirebilir (Hamada, ve ark, 2023).
2. Daha az su buharlaşması: Puzolanik malzemeler su buharlaşmasını azaltabilir, bu da çatlamayı önlemeye ve betonun dayanıklılığını artırmaya yardımcı olabilir (Yang, Ren, ve ark, 2023).
3. Geliştirilmiş yapışma: Puzolanik malzemeler yapışmayı iyileştirebilir, ayrışmayı azaltabilir ve betonun genel kalitesini iyileştirebilir (Yang ve ark, 2024).
4. Artan elastik modül: Puzolanik malzemeler betonun elastik modülünü artırarak sertliğini ve yük taşıma kapasitesini artırabilir (Çeçen ve ark, 2023).
5. Daha düşük hidrasyon ısı: Puzolanik malzemeler hidrasyon ısısını azaltabilir, bu da termal çatlamayı önlemeye ve betonun uzun vadeli dayanıklılığını artırmaya yardımcı olabilir (Jiang ve ark, 2024).
6. Kimyasal olarak agresif ortamlara karşı artan direnç: Puzolanik malzemeler, betonun deniz ve hidrolik yapılarda bulunanlar gibi kimyasal olarak agresif ortamlara karşı direncini artırabilir (Tayeh ve ark, 2022).
7. Alkali-silika reaksiyonunun engellenmesi: Puzolanik malzemeler alkali-silika reaksiyonunu engelleyebilir ve bu da beton yapılarda ciddi hasara neden olabilir (Tayeh ve ark, 2022).
8. Artan geç basınç dayanımları: Puzolanik malzemeler geç basınç dayanımlarını artırarak yeterli kürlenme sağlayabilir (Tayeh ve ark, 2022).
9. Sürdürülebilirlik faydaları: Puzolanik malzemeler, beton üretiminde portland çimentosunun bir kısmının yerini alabilir ve çimento üretimiyle ilişkili enerji tüketimini ve CO<sub>2</sub> emisyonlarını azaltabilir (Hamada, ve ark, 2023).

Bununla birlikte, puzolanik malzemelerin kullanımının, daha uzun bir kürlenme süresi ve daha düşük erken dayanım kazanımı gibi, prefabrik uygulamalar için uygun

olmayabilecek ve potansiyel olarak inşaat sürelerini artırabilecek bazı dezavantajlara sahip olabileceğinin de dikkate alınması önemlidir (Tayeh ve ark, 2022). Ek olarak, puzolanik malzemelerin kullanımı beton üretimi sırasında su talebini artırabilir ve karbonatlaşmaya karşı direnci düşürebilir, bu da karbon (siyah) çelik donatının korozyon riskini artırabilir (Tayeh ve ark, 2022).

## **1.2. Ultra Yüksek Performanslı Betona (UYPB) Genel Bakış**

UYPB, olağanüstü güç ve dayanıklılık sunan son teknoloji ürünü çimento esaslı bir malzemedir. 150 MPa'dan daha yüksek bir basınç dayanımı ile bilinir. Bu özelliği, onu geleneksel betondan önemli ölçüde daha güçlü kılar. UYPB tipik olarak su/çimento oranı 0,25'ten az olan portland çimentosu, kuvars unu, ince silis kumu ve dumanı, yüksek oranda su azaltıcılar ve liflerin bir karışımından oluşur. Bu malzeme, yüksek basınç dayanımı, çekme dayanımı ve çatlama sonrası süneklik gibi üstün yönleri ile geniş bir uygulama alanına sahiptir (Liu ve ark, 2024).

UYPB, olağanüstü dayanıklılığına ve korozyona, aşınmaya ve darbeye karşı direncine katkıda bulunan yoğun ve kompakt mikro yapısı, düşük su/bağlayıcı oranı ve azaltılmış gözenekliliğiyle bilinir. Malzemenin genellikle 2400 ile 2500 kg/m<sup>3</sup> arasında değişen yüksek yoğunluğu, mukavemetini ve performansını artırır. Ek olarak, UYPB sıklıkla çatlak ilerlemesini önlemede ve betonun genel yoğunluğunu arttırmada çok önemli bir rol oynayan lifler içerir (Khayat ve ark, 2019; Liu ve ark, 2024).

Termal özellikler açısından UYPB, aşırı sıcaklık koşullarında önemli ölçüde güç kaybı yaşayabileceğinden, yüksek sıcaklıklara veya yangına maruz kaldığında zorluklarla karşı karşıya kalır. Bu güvenlik açığına rağmen UYPB, inşaat hızı, gelişmiş estetik, üstün dayanıklılık ve sızdırmazlık gibi özelliklerin benzersiz birleşimi nedeniyle tercih sebebidir. Malzemenin çok yönlülüğü, köprüler, yüksek binalar ve prefabrik elemanlar gibi yapı mühendisliğinde yenilikçi çözümlere olanak tanır (Khayat ve ark, 2019; Liu ve ark, 2024).

Genel olarak UYPB, olağanüstü performans özellikleri ve endüstride devrim yaratma potansiyeli ile inşaat için umut verici bir gelecek sunan, beton teknolojisinde önemli bir ilerlemeyi temsil etmektedir.

### **1.2.1. UYPB'nin özellikleri**

UYPB, belirtilen dayanıklılık, çekme sünekliği ve tokluk gereksinimlerine sahip, minimum belirtilen basınç dayanımı 150 MPa olan çimentolu bir beton malzemedir (Guo ve ark, 2024; J. Yang, Wang, ve ark, 2023). Lifler genellikle belirtilen gereksinimleri karşılamak için karışıma dahil edilir. UYPB, yüksek kaliteli yüzey görünümüne sahip son derece kalıplanabilir ürünler sunarken, süneklik, güç ve dayanıklılık gibi üstün teknik özellikleriyle bilinir (Guo ve ark, 2024). Malzemenin benzersiz özellik ve tasarım esnekliği kombinasyonu, yenilikçi ve estetik açıdan hoş yapıların yaratılmasını kolaylaştırır.

UYPB, yüksek performanslı betona (YPB) kıyasla gelişmiş güç, dayanıklılık, süneklik ve uzun vadeli performans gibi üstün özellikler sergileme eğilimindedir (Aziz & Ahmed, 2012). UYPB tipik olarak yüksek mukavemetli çimentolu malzemeler, ince agregalar ve elyaflardan yapılır ve bu da gözenekliliği ve geçirgenliği azaltılmış yoğun ve kompakt bir mikro yapı sağlar (C. Wu ve ark, 2018).

UYPB, olağanüstü performans özellikleri ve endüstride devrim yaratma potansiyeli nedeniyle köprüler, yüksek binalar ve prefabrik elemanlar başta olmak üzere çeşitli uygulamalarda yer almaktadır. Malzemenin çok yönlülüğü, köprüler, yüksek binalar ve prefabrik elemanlar gibi yapı mühendisliğinde yenilikçi çözümlere olanak tanır. UYPB'nin üstün dayanıklılığı, geçirimsizliği ve korozyona, aşınmaya ve darbeye karşı direnci, bakım ihtiyacının azalması ve yapıların ömrünün uzaması anlamına gelir (Akhnoukh & Buckhalter, 2021).

### **1.2.2. UYPB karışımlarında puzolan kullanılmasının önemi**

Puzolanlar gibi gelişmiş malzemeler, benzersiz özellikleri ve faydaları nedeniyle UYPB karışımları için çok önemlidir. Doğal puzolanlar gibi puzolanlar da yer kabuğunda doğal olarak oluşan veya endüstriyel süreçlerin yan ürünleri olarak üretilen malzemelerdir. Eski Yunan ve Roma dönemlerinden beri beton yapımında kullanılmışlardır ve bugün çimentoda kullanılan klinker miktarının yerini alarak daha sürdürülebilir bir yapı malzemesi oluşturmak için kullanılmaktadırlar (Abdellatif ve ark, 2023).

UYPB karışımlarında puzolanların kullanımı, artan geç basınç dayanımı, kimyasal olarak agresif ortamlara karşı geliştirilmiş direnç ve betonu zayıflatan alkali-silika reaksiyonunun engellenmesi gibi avantajlar sağlar (Raj R ve ark, 2024). Ayrıca

puzolanlar betonun dayanıklılığını ve esnekliğini artırır, beton binaların servis ömrünü uzatır ve bakım maliyetlerini düşürür, böylece yapılı çevrenin ekonomik, sosyal ve çevresel sürdürülebilirliğini artırır (Amran ve ark, 2023).

UYPB, beton yapıların performansını ve sürdürülebilirliğini artırmak için pratik bir çözüm olma potansiyeli sunan, yüksek mukavemetli ve mükemmel dayanıklılığa sahip gelişmiş çimentolu bir malzemedir (Azme & Shafiq, 2018). UYPB'deki son trendler arasında, yüksek mukavemet sağlamak için gelişmiş elyaflı ve çimentolu malzeme teknolojilerinin kullanılmasının yanı sıra, UYPB'nin performansını optimize etmek için yeni karışım tasarımları ve üretim tekniklerini kapsamaktadır (Amran ve ark, 2022).

Özetle, UYPB karışımlarında puzolanlar gibi gelişmiş malzemelerin kullanılması, beton yapılarda yüksek mukavemet, dayanıklılık ve sürdürülebilirlik açısından kritik öneme taşır. Mühendisler ve mimarlar, puzolanları UYPB karışımlarına dahil ederek hiçbir zaman paslanmayacak, en zorlu ortamlara maruz kalabilecek ve hizmet ömürleri boyunca en şiddetli yükleme senaryolarından bazılarını direnebilecek ve çevre dostu ayak izine sahip yapılar tasarlayıp inşa edebilirler (Alsomiri ve ark, 2021).

### **1.2.3. İnce öğütülmüş pomza ve porselen parlatma atığı tozunun özellikleri**

İnce öğütülmüş pomza, betonun mukavemetini ve dayanıklılığını potansiyel olarak artırabilen puzolanik bir malzemedir (Binici, 2007). Öğütülmüş ince pomza ile hafif kompozitlerin üretimi, tarihi binaların rehabilitasyonu ve peyzaj çalışmalarında kullanılmaktadır. Kendiliğinden yerleşen harçlarda ince pomza tozunun kullanılması, mekanik özellikleri ve dayanıklılığın yanı sıra, aşağıdaki bölümde tartışıldığı gibi, donatı ile yapışma davranışını da geliştirebilmektedir (Benli ve ark, 2017). İnce öğütülmüş pomza, aynı zamanda beton karışımlarında ince agrega yerine de kullanılabilir (Sarıdemir & Bulut, 2021).

Yüksek silika içeriğine sahip ince öğütülmüş porselen parlatma atığı tozu, betonun mukavemetini ve dayanıklılığını potansiyel olarak artırabilmektedir. Betonda puzolanik aktif madde olarak porselen parlatma atığı tozunun kullanılması betonun nihai özelliklerini iyileştirebilmektedir (Asghari & Mohammadyan-Yasouj, 2024; de Matos ve ark, 2020; Ke ve ark, 2016; Ramos ve ark, 2020).

Özetle hem ince öğütülmüş pomza hem de porselen parlatma atığı tozu, betonun mukavemetini ve dayanıklılığını potansiyel olarak artırabilen puzolanik

malzemelerdir. Beton karışımlarında ince agrega yerine kullanılabilmekte ve kendiliğinden yerleşen harçlarda kullanımları mekanik özellikleri ve dayanıklılığı geliştirebilmektedir. Öğütülmüş ince pomza ile hafif kompozitlerin üretiminde, tarihi yapıların rehabilitasyonunda ve peyzaj çalışmalarında kullanılmaktadır.

### 1.3. Önceki Çalışmalar

Son kırk yılda toplumsal ve ekonomik faaliyetler önemli ölçüde gelişmiştir. Dünya Meteoroloji Örgütü (World Meteorological Organization - WMO) ve Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC)'ne göre, bu girişimler dünya çapındaki iklim değişikliğinin ana nedenlerinden biridir (van Vuuren ve ark, 2012). Beton, çoğunlukla çimentodan yapılmaktadır (Alqarni, 2022). Betonun yüksek dayanıklılığı, bol miktarda bulunması, herhangi bir şekil veya boyutta kalıplanabilmesi ve düşük maliyetli olması nedeniyle kullanılmaktadır (Y. Li ve ark, 2023). Yapı teknolojisinde beton ve bağlayıcı malzemelerin üretiminde kullanılan süreçler de dikkate alınmaktadır. Yapı teknolojisinde beton ve bağlayıcı malzemelerin üretiminde kullanılan süreçler de dikkate alınmaktadır. Donatısız ve donatılı betonlarda çimento en yaygın bağlayıcıdır (Amran ve ark, 2022). Küresel normal portland çimentosu (NPÇ) üretimi her yıl %9 artmakta (Alqarni, 2022). Bu sebeple, çimento üretimi sırasında atmosfere salınan yüksek miktarda karbondioksit nedeniyle bu artış oranı çevreyi tehdit etmektedir (Amran ve ark, 2022; Ntuli ve ark, 2022). Çimento imalat endüstrisinin yılda yaklaşık 1,5 Milyar ton sera gazı (SG) ürettiği bilinmektedir. Bu, dünyanın toplam sera gazı üretiminin yaklaşık %6'sına denk gelmektedir (Ishak & Hashim, 2022).

İnsan nüfusundaki olağanüstü artış ve hızlı sanayileşme nedeniyle, çimento üretimi toplam sera gazı üretiminin %9'una katkıda bulunuyor (Rodríguez-Benavides ve ark, 2024). Beton ve çimento inşaatının muazzam hacmi nedeniyle, kürlleme ve harmanlama için sürekli olarak büyük hacimlerde tatlı su gereklidir. Bu nedenle, büyük bir su kıtlığı riski vardır (Azeem ve ark, 2023). Çimento üretimi için gereken enerji miktarı, atmosfere salınan karbondioksit miktarıyla orantılıdır. Fosil yakıtlar, çimento üretimi için gereken enerjinin önemli bir kısmını oluşturmaktadır (Griffiths ve ark, 2023; Rodríguez-Benavides ve ark, 2024; Singh, 2023).

İnşaat yıkım atıkları gibi uzun ömürlü biyolojik olarak bozunmayan çöpler, endüstriyel atık yönetimini küresel olarak endişelendiriyor ve günümüz toplumlarının karşılaştığı

en zor sorunlardan biridir (Azeem ve ark, 2023). Yeni binaların inşasında biyolojik olarak bozunmayan atıkların yeniden kullanılması ekonomik ve teknik olarak uygundur. 2030 yılına kadar, bu tür malzemelerin yeniden kullanımının hammadde üretimini %17-24 oranında azaltacağı ve Avrupa inşaat endüstrisi için yıllık 630 milyar € tasarruf sağlayacağı tahmin edilmektedir. Bu azalmanın nedenleri arasında doğal kaynakların mevcudiyeti ve konumu, doğal agrega kaynağına olan uzaklık ve değerlendirilmeyi destekleyen yasal ve örgütsel mekanizmaların tasarımı yer alıyor (Boyaiah & Rao, 2017; Karthikeyan ve ark, 2020).

Doğal kaynakların tükenmesi ve korunması için acil ihtiyaç, mineraller, endüstriyel atık ve atıl tarımsal ürünlerin alternatif malzeme kullanılmalıdır (Almeshal ve ark, 2020; Lamba ve ark, 2022). Uluslararası Enerji Ajansı, fosil yakıtlardan kaçınmak ve daha uygun alternatif yakıtlara geçmenin hayati olduğunu vurgulamıştır. AB, 2020'de %21 olan yenilenebilir enerji kaynaklarının üretim hedefi 2030'da %28'e yükseleceğini öngörülmüştür (Dellano-Paz ve ark., 2015; Di Foggia & Beccarello, 2024).

İnşaat sektöründe çevre dostu sürdürülebilir ürünler kullanma ihtiyacı, alternatif doğal ve geri dönüştürülmüş madde kaynaklarının yanı sıra diğer sektörler tarafından üretilen atıkların araştırılmasına yol açtı (Ige, 2023; Kalisz ve ark, 2022; Praveenkumar ve ark, 2024). İklim değişikliğinin ana nedenlerinden biri, fosil yakıtların yanmasından kaynaklanan sera gazı emisyonlarıdır. Küresel antropojenik emisyonların %5-8'inde çimento endüstrisi önemli bir rol oynamaktadır. 2050 yılına kadar bu oran %12-23'e yükselebilir (Islam ve ark, 2020; Ozkan ve ark, 2024).

Yeşil beton yapmak için tamamlayıcı çimentolu malzeme (TÇM) kullanılması, atıkların düzenli depolama alanlarına boşaltılmasını önemli ölçüde azaltabilir. Sanayi, tarım ve su ürünleri atıkları, küller, tozlar, doğal mineraller ve tozlar, bu atık ürünlerden sadece birkaçıdır (Ige, 2023; Ozkan ve ark, 2024; Paris ve ark, 2016).

Son araştırmalara göre, NPC üretim süreci, büyük miktarda karbondioksit yaymaktadır. Çimentonun çevreye verdiği zararların azaltılması için yerine geçecek ya da kısmen ikame olabilecek malzemeler kullanılmaktadır (H. Li ve ark, 2023; Nuripuoh ve ark, 2022; Zarasvand ve ark, 2023). Bu alternatif malzemelerin kısmi ikamesi, yakıt tüketimini ve karbondioksit emisyonlarını azaltmanın yanı sıra beton özelliklerini geliştirip sürdürülebilirliği de artırmıştır (H. Li ve ark, 2023; Nuripuoh ve

ark, 2022). TÇM'lerin çevresel ve ekonomik artıları nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır (Acikgenc Ulas ve ark, 2024; Ndahirwa ve ark, 2022). TÇM, taze ve sertleşmiş çimento bazlı malzemelerin ve beton karışımlarının hidratasyon performansı üzerine etkileri hakkında yapılar araştırmalar sonucunda, pomza tozunun (PT) prekast uygulamaları için hazır betondan daha iyi olduğunu görülmektedir (Ahmadi ve ark, 2023; Patrick ve ark, 2024).

Bu tür volkanik maddelerin bilinçli bir şekilde kullanılması, çimento bazlı malzemelerin daha ucuza mal olmasına yardımcı olabilecek doğal kaynakların israfını önleyebilir. Son birkaç on yılda, PT ve volkanik külün (VK) beton ve çimento yapımında nasıl kullanılabileceğine dair bir dizi araştırma yapılmıştır (Acikgenc Ulas ve ark, 2024; J. X. Lu, 2023; Ndahirwa ve ark, 2022; Patrick ve ark, 2024).

Pomza dünya çapında üretilmektedir. İspanya, Yunanistan ve Türkiye gibi komşu ülkeler İtalya'yı en büyük pomza üreticisi olarak takip ediyor. Pomza, esasen hızla kaynayan bir magmanın içinde bulunan gaz ve suyun her yerinde bulunabilir. Bu nedenle, kıyı boyunca ortaya çıkan yanardağların birçoğu pomza üretmektedir. Bu taş, okyanus plakalarında suyun kabuğun altına sızdığı ve PT'yi oluşturduğu için okyanusun derinliklerinde bile bulunabilir. Hem tarihsel hem de çağdaş endüstride çok çeşitli kullanımları vardır (Askarian ve ark, 2019).

Allqarni bu çalışmada, volkanik pomza tozu külünün (VPTK)'nın betonda kullanımı ve işlenebilirlik, basınç, eğilme, yarma çekme dayanımı ve dayanıklılık performansı gibi beton özellikleri üzerindeki etkisi hakkında mevcut literatürün kapsamlı bir incelemesini sunmayı amaçlamaktadır. Ayrıca bu makale, taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanarak betonun mikro yapısını analiz ederek VPTK'nın sürdürülebilirlik üzerindeki etkisini incelemeyi amaçlamaktadır. Bulgular, kısmi ikame ile VPTK kullanımının işlenebilirlik ve basınç dayanımını azalttığı, eğilme ve yarmada çekme dayanımı ile dayanıklılık özelliklerinde ise iyileşme sağladığı sonucuna varılmıştır (Alqarni, 2022).

Geri dönüşüm tekniklerindeki son gelişmeler, yenilenemeyen kaynakları kısmen yenilenebilir kaynaklara dönüştürmüştür. Bu bağlamda, çöp sahalarına giden ekstra atıkları en aza indirmek için betonda tamamlayıcı çimentolu malzemelerin (TÇM'ler) işlevi kritik önem taşımaktadır. Çevre dostu beton üretiminde, büyük önem taşıyan çeşitli ürünler ve atıklar bulunmaktadır. Bu ürünler endüstriyel, tarımsal ve su ürünleri

atıkları, doğal mineraller, tozlar, tozlar ve küller olarak sınıflandırılabilir. Bu tür atıkların uygulanmasına ilişkin olarak literatür, VPTK yeşil beton üretiminde çimentoya kısmi ikame veya katkı maddesi olarak kullanılmasının büyük potansiyelini vurgulamıştır. Karbondioksit, iklim değişikliği ve diğer çevre kirlilikleri ile olumlu yönde ilişkili olduğundan, TÇM'lerin kullanılmasının temel amacı karbondioksit emisyonlarını azaltmaktır. Atık ve atıl malzemelerin bertarafını sağlar.

Hafif agregalar arasında, betonda kaba agregaların yerini alabilen pomza taşı (PT) bir seçenektir. Bu çalışmada, doğal iri agregalar çeşitli oranlarda PT ile değiştirilmiştir. Deneyler, yanıt yüzey metodolojisi (YYM) kullanılarak karışımlar (değişen PT oranlarıyla) hazırlamak için tasarlanmıştır. Betonun işlenebilirliği gibi taze özelliklerini araştırmak için çökme ve sıkıştırma faktörü testleri kullanılır. Buna karşılık, sertleşmiş beton özellikleri basınç dayanımı (BD), eğilme dayanımı (ED) ve yarmada çekme dayanımı (YÇD) kullanılarak belirlenmiştir. Modelin deneysel, optimizasyon ve doğrulama sonuçları, BD'nin 15 MPa'dan büyük olduğu, YÇD'nin BD'nin %7-12'si ve ED'nin BD'nin % 9-11'i olduğu 7 ve 56 kür günü için hafif agregalı betonda PT'nin %30'una kadarının değiştirilebileceğini göstermektedir. Bu nedenle, mevcut çalışma için optimum BD 17 ila 20 MPa arasında, YÇD BD'nin %9,39 ila %10,54'ü ve ED, BD'nin %17,49 ila %21,12'si arasında değişmektedir. İkinci dereceden model önerilmiş, varyans analizi (ANOVA) model uygunluğu YYM aracılığıyla üretilmiş ve her üç yanıt için 0,99'un (%99) üzerindeki belirleme katsayısı ( $R^2$ ) önerilen modelin yüksek önemini temsil etmiştir. Ayrıca,  $R^2$  ve düzeltilmiş  $R^2$  arasındaki fark göz ardı edilebilir seviyededir. BD, YÇD ve ED için P-Değeri 0.05'in (<0.0001) altındadır, bu da modelin yüksek uygunluğunu göstermektedir. Modeli iyileştirmek için YYM kullanılmış ve bu da daha sonraki laboratuvar deneylerinde doğrulanmıştır (Ali ve ark, 2023).

Xu ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, ömür boyu düşük karbonlu ultra yüksek performanslı beton (UYPB) üretmek için çimento yerine seramik karo atık tozu (SKAT) kullanılmıştır. 15-55 SKAT içeren UYPB'nin mekanik özellikleri, değişim mekanizması, çevresel etkileri ve maliyeti incelenmiştir. Elde edilen verilere göre, SKAT içeren UYPB, hata aralığı içinde 28 günde 120 MPa ve 14 MPa'dan fazla basınç ve eğilme dayanımına sahiptir. SKAT'nin %35 uygulandığı UYPB'nin mekanik özellikleri 28 günde en yüksek düzeyde iyileşmiştir. Ancak, SKAT'nin %55 uygulandığı UYPB'nin mekanik özelliklerinin tümü 28 günde %10'dan daha az

azalmıştır. SKAT'nin UYPB üzerindeki modifikasyon mekanizması, puzolanik aktivite analizi, TG-DTA, SEM ve MIP ile puzolanik etkileri, çekirdeklenme etkisini ve dolgu etkisini içermektedir. SKAT, puzolanik aktiviteye sahip olduğu için çimentonun hidrasyon derecesini %51,4'e kadar artırabilir. Ayrıca, %35 SKAT ilavesi UYPB'nin, toplam poroziteyi %15,7, mezogözenek sayısını sırasıyla %4,38 ve %42,04 azalttığı gözlemlenmiştir. Ek olarak, çevresel etkiler ve maliyet analizi yapılmıştır. %55 SKAT ilavesiyle UYPB'nin enerji yoğunluğu %41,0 % CO<sub>2</sub> emisyonları %33,1 ve malzeme maliyeti %25,5 düşürmüştür. 55 SKAT içeren UYPB, gelecek vaat eden düşük karbonlu tüm yaşam boyu betondur (Xu ve ark, 2021).

Seramik parlatma atığının (SPA) ultra yüksek performanslı betonun (UYPB) hidrasyon özellikleri, mikroyapı büyümesi ve mekanik özellikleri üzerindeki etkileri, Li ve grubu tarafından 2023'te açıklanmıştır (X. Li ve ark, 2023a). Bu çalışmada yardımcı çimento malzemeleri olarak silis dumanı (SD), seramik parlatma atığı (SPA) ve uçucu kül (UK) kullanılmıştır. SPA'lı UYPB'nin hidrasyon kinetiği daha sonra izotermal kalorimetri, düşük alan NMR ve kimyasal büzülme ile gösterilmiştir. SPA'lı UYPB'nin mikroyapısı ve hidrasyon ürünü de XRD, TGA ve SEM ile incelenmiştir. UYPB'nin işlenebilirliği ve mekanik özellikleri üzerindeki SPA ikamesinin etkisi incelenmiştir.

Çimentonun SPA ile ikame oranı %20'de olduğunda, UYPB'nin basınç dayanımı başlangıçta biraz düşmüştür. Bununla birlikte, 56. günde dayanımı SPA'sız UYPB ile karşılaştırılabilir hale gelmiştir. 28. günde, SPA'lı UYPB'lerin basınç dayanımının 120 MPa aşması dikkat çekicidir (X. Li ve ark, 2023c). Geri dönüşüm alanı, yenilenemeyen kaynakları kısmen yenilenebilir kaynaklara dönüştürülmektedir. Bu değişikliklere ek olarak, seramikler de dahil olmak üzere atıkların inşaatte agregaya alternatif olarak kullanılması, çok sayıda araştırmacı tarafından büyük bir ilgi odağıdır. İnşaat sahalarında malzeme eksikliği gibi karmaşık sorunları çözmek ve çevresel atıkları azaltmak için seramik atık agregalar kullanılabilir. Bu çalışma, seramik atıkları kaba agrega olarak kullanılarak hazırlanan ultra yüksek performanslı betonu (UYPB) iyileştirmek için silis dumanı (SD) ve metakaolinin (MTK) çimento ile değiştirilmesinin etkisini araştırılmış ve %10, %20 ve %30 SD veya MTK içeren on bir UYPB karışımı geliştirilmiştir. Daha sonra karışımların mikroyapı, fiziksel, mekanik ve taze özellikleri incelenmiştir. Test sonuçları, UYPB'nin mekanik ve fiziksel özelliklerinin SD veya MTK ile değiştirilmesi yoluyla iyileşebileceğini

göstermiştir. İnşaat atıklarının kullanılması, özellikle sürdürülebilir kalkınma için önemli teknik, ekonomik ve çevresel faydalar sağlayacaktır. SD veya MTK'nin değiştirilmesinin, özellikle  $\text{SiO}_2/\text{CaO}$  oranı 2,98'e yükseltildiğinde, UYPB'nin mukavemetini artırmada etkili olduğunu göstermiştir. Daha yoğun matris ve geliştirilmiş mikro yapının bir sonucu olarak, 28 gün boyunca UYPB, SD'nı ile 133,1 MPa'dan 146,6 MPa'ya yükseldiği görülmüştür (Amin ve ark, 2020).

Tamamlayıcı çimento malzemeleri (TÇM) portland çimentosu ile yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu makalede de benzer yaklaşım kalsiyum alüminyum çimentosu için uygulanmıştır. Potansiyel TÇM'ler porselen parlatma atığı tozu, kalsine şeyl ve sinterlenmiş mullittir. %5 veya %15 TÇM içeren çimento pastaları hazırlanmış ve bunların faz bileşimleri ile temel fiziksel ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Analiz edilen karışimli çimentolar sadece ortam sıcaklığında değil, aynı zamanda 1400 °C'ye ısıya maruz kaldıktan sonra bile, avantajlı bir performans göstermiştir. Porselen parlatma atığı tozu hidrasyon süreci üzerinde en önemli etkiye sahip olmuştur. Kalsine şeyl daha yüksek bir hidrasyon derecesine neden olurken, sinterlenmiş mullit öncelikle oluşan C-A-S-H fazlarını etkilemiştir (Koňáková ve ark, 2022).

Gonzales ve arkadaşları 2023 yılında yaptıkları bir çalışmada, doğal puzolan, metakaolin ve öğütülmüş granül yüksek fırın cürufu dahil olmak üzere tamamlayıcı çimentolu malzemeler içeren, tescilli olmayan UYPB hakkında kapsamlı bir çalışma yürüttüler. Çalışma, tüm karışımlarda uçucu kül veya silis dumanının doğal puzolan, metakaolin ya da ÖYFC ile değiştirilmesinin, 49 J'den daha yüksek tokluk değerleri ve 10 MPa'dan daha yüksek kopma modülü ürettiğini ve bunun da gelişmiş mekanik özellikler ve dayanıklılığa işaret ettiğini rapor etmiştir (Gonzales ve ark, 2023)

2019'da Ahmad ve çalışma arkadaşları, UYPB karışımlarında çimento ve mikro silikanın kısmi ikamesi olarak doğal puzolanın eklenmesinin etkisini araştırdılar. Çalışmada, çimento (%30'a kadar) ve silis dumanının (%50'ye kadar) doğal bir puzolanla kısmen değiştirilmesinin, gelişmiş mekanik özelliklere ve dayanıklılığa sahip UYPB ile sonuçlandığını belirtilmiştir (Ahmad ve ark, 2019).

2024 yılında, Kravanja ve çalışma ekibi UYPB'nin üretimi ve uygulamalarına ilişkin kapsamlı bir inceleme yapmışlardır. İncelemede UYPB üretiminde bağlayıcı malzemeler olarak pirinç kabuğu külü, silis dumanı, uçucu kül, granül yüksek fırın cürufu, cam tozu ve metakaolin gibi puzolanik malzemelerin kullanımı tartışılmıştır.

Bu çalışma sonunda; artan geç basınç dayanımı, kimyasal olarak agresif ortamlara karşı geliştirilmiş direnç ve alkali-silika reaksiyonunun inhibisyonu dahil olmak üzere puzolanik malzemelerin kullanımının faydaları vurgulanmıştır (Kravanja ve ark, 2024).

#### **1.4. Literatür Boşluğu ve Gerekçesi**

Mevcut literatür, ince öğütülmüş pomza ve porselen parlatma atığı tozunun çeşitli beton türlerinde puzolanik malzeme olarak kullanımını araştırmıştır. Ancak, pomza ve porselen parlatma atığı tozunun UYPB karışımlarında kullanımına ilişkin araştırmalarda bir boşluk bulunmaktadır. UYPB karışımlarında ince öğütülmüş pomza ve porselen parlatma atığı tozunun puzolanik malzeme olarak kullanılmasının potansiyel faydaları arasında gelişmiş mekanik özellikler, dayanıklılık ve mikro yapı bulunmaktadır (de Matos ve ark, 2020; Medeiros ve ark, 2021; Ramos ve ark, 2020).

Araştırma boşluğu, ince öğütülmüş pomza ve porselen parlatma atığı tozunun UYPB karışımlarında puzolanik malzemeler olarak etkilerini özel olarak araştıran çalışmaların eksikliğidir. Literatürdeki bu boşluk önemlidir. Çünkü, UYPB benzersiz özelliklere ve gereksinimlere sahip oldukça uzmanlaşmış bir beton türüdür. Bu nedenle, ince öğütülmüş pomza ve porselen parlatma atığı tozunun UYPB karışımlarında nasıl davranacağını ve malzemenin nihai özelliklerini nasıl etkileyeceğini anlamak önemlidir.

Bu araştırma boşluğunun doldurulmasının diğer nedeni de daha sürdürülebilir ve uygun maliyetli UYPB karışımlarının geliştirilmesine katkıda bulunma potansiyeline sahip olmasıdır. İnce öğütülmüş pomza ve porselen parlatma atığı tozu, UYPB karışımlarında halihazırda kullanılan daha pahalı ve kaynak açısından yoğun malzemeler olan silis dumanının yerini potansiyel olarak alabilecek, hem bol hem de nispeten ucuz malzemelerdir. Ek olarak, UYPB karışımlarında ince öğütülmüş pomza ve porselen parlatma atığı tozunun puzolanik malzeme olarak kullanılması, malzemenin mekanik özelliklerini, dayanıklılığını ve mikro yapısını iyileştirme potansiyeline sahiptir.

Özetle araştırma boşluğu, ince öğütülmüş pomza ve porselen parlatma atığı tozunun UYPB karışımlarında puzolanik malzemeler olarak etkilerini özel olarak araştıran çalışmaların eksikliğidir. Bu boşluğu doldurmak önemlidir. Çünkü, daha sürdürülebilir ve uygun maliyetli UYPB karışımlarının geliştirilmesine katkıda bulunmanın yanı sıra

malzemenin mekanik özelliklerini, dayanıklılığını ve mikro yapısını iyileştirme potansiyeline sahiptir.





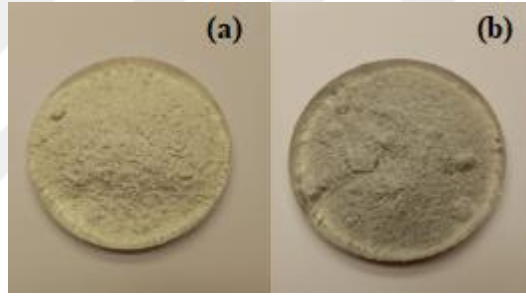
## 2. MATERİYAL VE METOT

### 2.1. Materyal

Bu bölümde, hammaddelerin özellikleri, numunelerin kodlanması ve hazırlanması, yapılan testler ve analizler sunulmuştur.

#### 2.1.1. Bağlayıcılar

Karışımlarda, beyaz Portlant çimentosu (CEM I 52,5/R ÇİMSA) ve silis dumanı (Eklem Microsilica 920E) kullanılmıştır (Şekil. 2.1). Tablo 2.1’de çimentonun, Tablo 2.2’de silis dumanının detaylı özelliklerine yer verilmiştir. Ayrıca, kullanılan çimentonun ve silis dumanının tane boyutu analizleri Şekil 2.2’de verilmiştir.



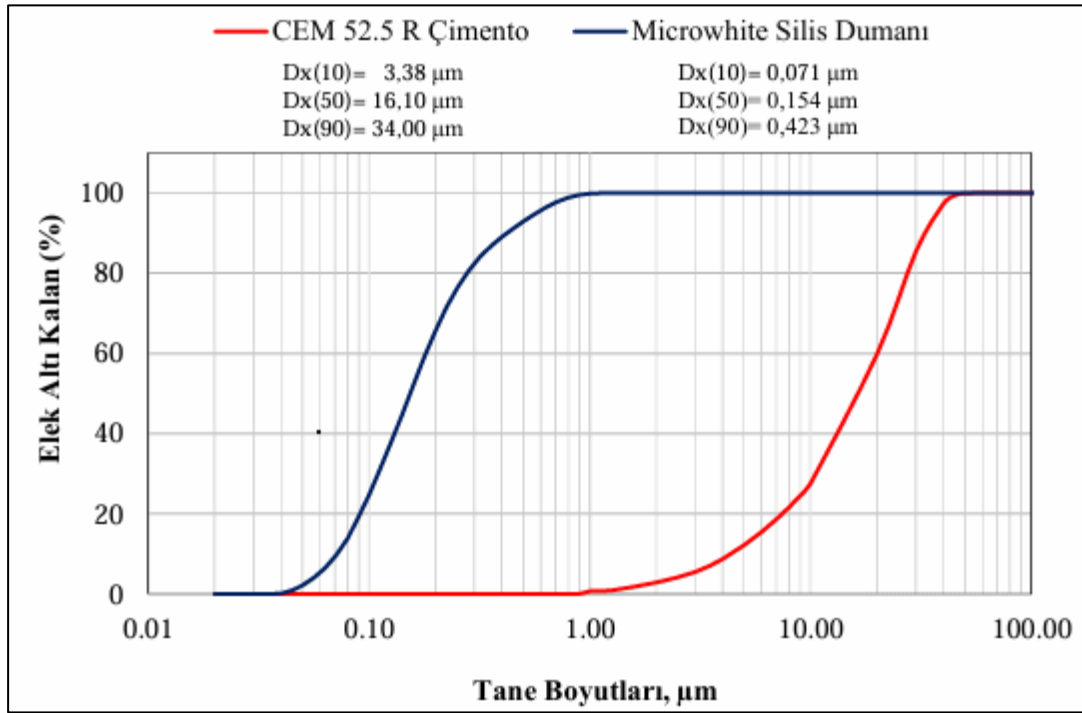
Şekil 2.1. Çimento (a); silis dumanı (b).

Tablo 2.1. Çimentonun kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri.

| Kimyasal Özellikler              |      | Fiziksel Özellikler                |       |
|----------------------------------|------|------------------------------------|-------|
| % SiO <sub>2</sub>               | 21,6 | Özgül Ağırlık (g/cm <sup>3</sup> ) | 3,06  |
| % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 4,05 | Özgül Yüzey (cm <sup>2</sup> /g)   | 4600  |
| % Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0,26 | Priz Başlangıcı (sa/dk)            | 01:40 |
| % CaO                            | 65,7 | Priz Sonu (sa/dk)                  | 02:10 |
| % MgO                            | 1,30 | Hacim sabiti (mm)                  | 1     |
| % SO <sub>3</sub>                | 3,30 | 45 µm Elek bakiyesi                | 1     |
| % Na <sub>2</sub> O              | 0,30 | 95 µm Elek bakiyesi                | 0,1   |
| % K <sub>2</sub> O               | 0,35 | Mekanik Özellikler                 |       |
| % Klorür (Cl)                    | 0,01 | Basınç Dayanımı (MPa)              |       |
| % S. CaO                         | 1,60 | 2.Gün                              | 37    |
| % Çözünmeyen kalıntı             | 0,18 | 7.Gün                              | 50    |
| % Kızdırma kaybı                 | 3,20 | 28.Gün                             | 60    |

**Tablo 2.2.** Silis dumanının fiziksel ve kimyasal özellikleri.

| Özellikler                 | Birim             | Değer                |
|----------------------------|-------------------|----------------------|
| SiO <sub>2</sub>           | %                 | Minimum 85,0         |
| SO <sub>3</sub>            | %                 | Maksimum 2,0         |
| Cl                         | %                 | Maksimum 0,3         |
| Serbest CaO                | %                 | Maksimum 1,0         |
| Serbest Si                 | %                 | Maksimum 0,4         |
| Başlama kaybı              | %                 | Maksimum 4,0         |
| Özel yüzey alanı           | m <sup>2</sup> /g | Min. 15,0, Mak. 35,0 |
| Puzolanik aktivite indeksi | %                 | Minimum 100          |



**Şekil 2.2.** Çimento ve silis dumanı tane boyutu analizi.

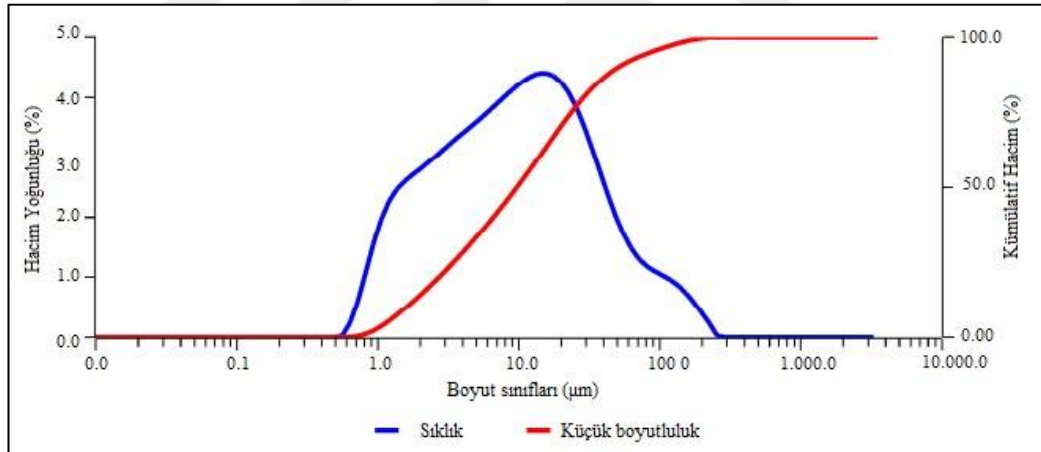
UYPB karışımlarında, Çanakkale'deki Etili Seramik adlı bir üretici firmadan elde edilen porselen parlatma atık malzemesi, silis dumanı yerine ikame malzemesi olarak kullanılmıştır. Porselen parlatma atığı, başlangıçta kırıcı bir işleminden geçirilmiş, daha sonra kurutulmuş ve son olarak bilyalı öğütücüde 0,125 mm elekten geçirilerek öğütülmüştür (Şekil 2.3). PPAT kimyasal içerikleri Tablo 2.3'te verilmiştir. Porselen parlatma atığı tozunun (PPAT) tane boyutu ölçümlerine ait grafik Şekil 2.4'te elde edilen veriler ise Tablo 2.4'te gösterilmektedir.



**Şekil 2.3.** Porselen parlatma atığı tozu.

**Tablo 2.3.** Porselen parlatma atığı tozunun kimyasal bileşenleri.

| Özellikler                     | Birim | Değer     |
|--------------------------------|-------|-----------|
| SiO <sub>2</sub>               | %     | 67-69     |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | %     | 18,5-19,5 |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | %     | 1-1,5     |
| K <sub>2</sub> O               | %     | 1-1,5     |
| Na <sub>2</sub> O              | %     | 5,0-6,0   |
| CaO                            | %     | 0,5-1,0   |
| MgO                            | %     | 0,5-1,0   |



**Şekil 2.4.** Porselen parlatma atık tozu tane boyut analizi.

**Tablo 2.4.** Porselen parlatma atığı tozu tane analizi.

| Özellik              | Değer                    |
|----------------------|--------------------------|
| Spesifik Yüzey Alanı | 668,4 m <sup>2</sup> /kg |
| D [3:2]              | 4,49 µm                  |
| D [4:3]              | 20,6 µm                  |
| Birimler             | Hacim                    |
| Dv (10)              | 1,59 µm                  |
| Dv (50)              | 9,67 µm                  |
| Dv (90)              | 50,3 µm                  |

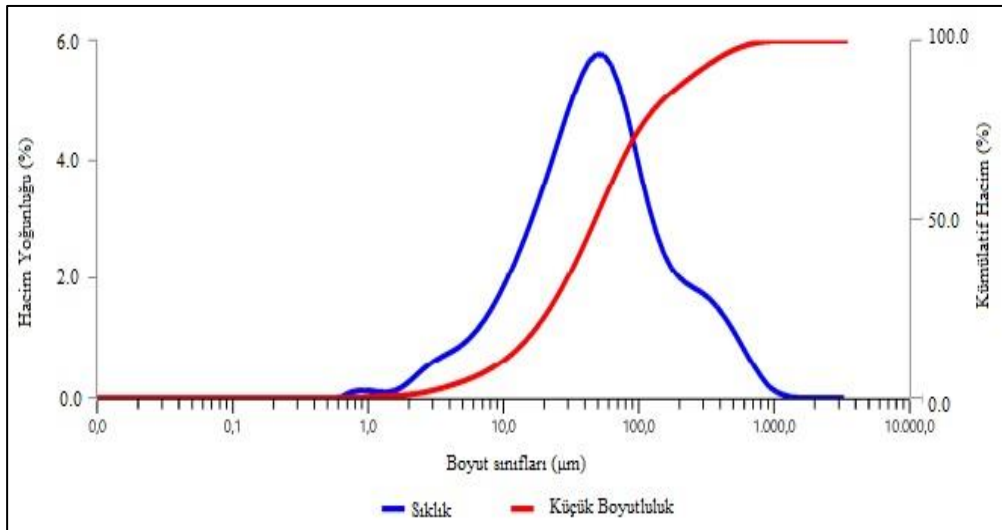
Uygulamaya konan karışımlarda, ayrıca Erzurum'da faaliyet gösteren Kale Blokbims adlı üretici firma tarafından temin edilen pomza tozu, silis dumanı ikame malzemesi olarak kullanılmıştır. Pomza, öncelikle 1 milimetrelilik bir kırıcıdan geçirilerek öğütülmüştür (Şekil 2.5). Kimyasal bileşenleri Tablo 2.5'te verilmiştir. Pomza tozunun (PT) tane boyutu ölçümlerine ait grafik Şekil 2.6'da elde edilen veriler ise Tablo 2.6'da gösterilmektedir

**Tablo 2.5.** Pomza tozunun kimyasal bileşenleri.

| Özellikler                           | Birim | Değer         |
|--------------------------------------|-------|---------------|
| SiO <sub>2</sub>                     | %     | 60-75         |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>       | %     | 13-17         |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>       | %     | 1-3           |
| K <sub>2</sub> O + Na <sub>2</sub> O | %     | 7-8           |
| CaO                                  | %     | 1-2           |
| TiO <sub>2</sub>                     | %     | Eser miktarda |
| SiO <sub>3</sub>                     | %     | Eser miktarda |



**Şekil 2.5.** Pomza tozu.



**Şekil 2.6.** Pomza tozu tane boyut analizi.

**Tablo 2.6.** Pomza tozu tane analizi.

| Özellik              | Değer                   |
|----------------------|-------------------------|
| Spesifik Yüzey Alanı | 1476 m <sup>2</sup> /kg |
| D [3:2]              | 20,4 µm                 |
| D [4:3]              | 94,6 µm                 |
| Birimler             | Hacim                   |
| Dv (10)              | 9,64 µm                 |
| Dv (50)              | 47,7 µm                 |
| Dv (90)              | 244 µm                  |

### 2.1.2. Agregalar

Karışımlarda dolgu malzemesi olarak TSE ve AFS (American Foundry Society) standartlarına uygun, tane çapı ortalama 212 µm olan ve %98,9 SiO<sub>2</sub> içeren (Tablo 2.7), Çeliktaş tarafından üretilen 60-70 AFS silis kumu kullanılmıştır (Şekil 2.7).



**Şekil 2.7.** Silis kumu.

**Tablo 2.7.** Silis kumu kimyasal bileşenleri.

| Kimyasallar                                 | Birim | Değer |
|---------------------------------------------|-------|-------|
| SiO <sub>2</sub>                            | %     | 98,2  |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>              | %     | 0,17  |
| MgO                                         | %     | 0,04  |
| CaO                                         | %     | 0,02  |
| K <sub>2</sub> O                            | %     | 0,14  |
| Na <sub>2</sub> O                           | %     | 0,02  |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ve Diğerleri | %     | 1,33  |

### 2.1.3. Çelik lifler

Bekaert şirketinden temin edilen çelik lifler kullanılmıştır (Şekil 2.8). Tablo 2.8’de çelik lifin özellikleri verilmiştir.



**Şekil 2.8.** Çelik lifler.

**Tablo 2.8.** Çelik lifin özellikleri.

|                         |                     |
|-------------------------|---------------------|
| Ürün Tipi               | : DRAMIX® OL 13/.16 |
| Lif şekli               | : Düz               |
| Uzunluk (mm)            | : 12 mm             |
| Çap (mm)                | : 0,15 mm           |
| En boy oranı            | : 87                |
| Özgül ağırlık           | : 7,8               |
| Çekme Dayanımı (MPa)    | : 3000              |
| Elastisite Modülü (GPa) | : 200               |

#### 2.1.4. Akışkanlaştırıcı

İşlenebilirliğin sağlanması için modifiye polikarboksilat bazlı (Ductal®F4 marka) süper akışkanlaştırıcı (SA) polimer kullanılmıştır (Şekil 2.9). SA'nın genel özellikleri Tablo 2.9'da verilmiştir.



**Şekil 2.9.** Süper akışkanlaştırıcı

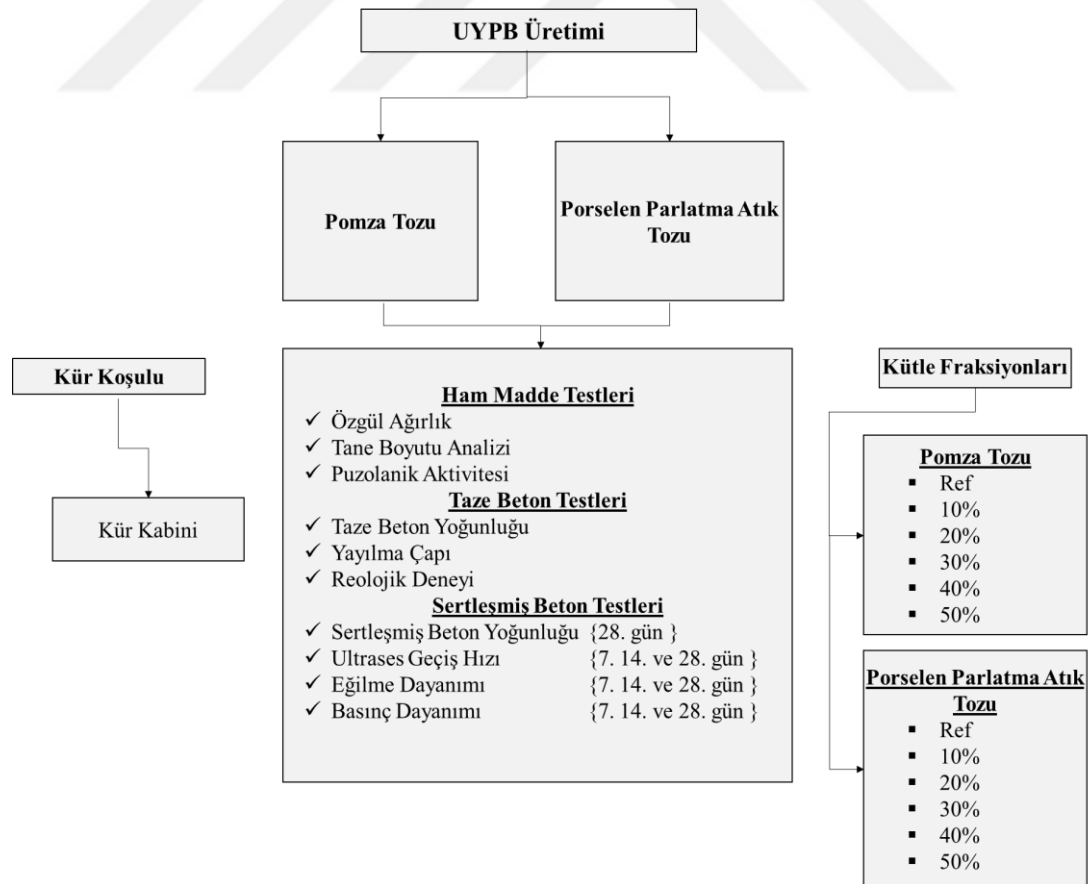
**Tablo 2.9.** Süper akışkanlaştırıcının özellikleri.

| <b>Fiziksel Özellikler</b>                        |
|---------------------------------------------------|
| Formu: Sıvı                                       |
| Renk: Açık sarı                                   |
| Raf ömrü: 12 ay                                   |
| <b>Teknik Özellikler</b>                          |
| Özgül ağırlık: $1,080 \pm 0,020$                  |
| pH: $4,4 \pm 0,5$                                 |
| Katı madde içeriği (halojen): $40,00\% \pm 1,0\%$ |

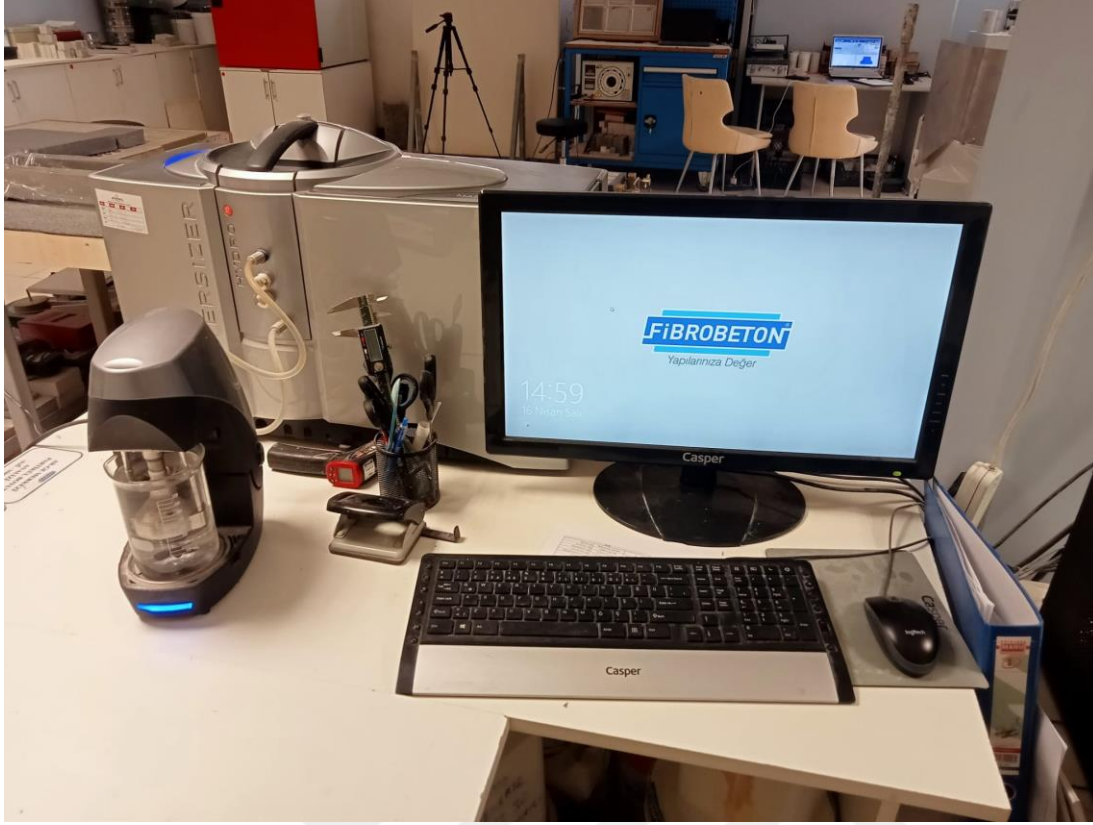
## 2.2. Metot

Yapılan çalışmalar Şekil 2.10'da şematik olarak gösterilmiştir. Çalışmanın metodolojik temeli, öncelikle ham madde testlerini kapsamaktadır.

Bu bağlamda, porselen parlatma atığı tozu (PPAT) ve pomza tozu (PT)'nin özgül ağırlıkları, puzolanik aktiviteleri belirlenmiştir. Ayrıca, tane boyutu analizleri Fibrobeton AR-GE merkezinde bulunan (Malvern marka Mastersizer 3000 model) cihaz kullanılarak belirlenmiştir (Şekil 2.11). Bu cihaz, sayesinde ölçülen numunelerin tane boyutu dağılımları ve yüzey alanı analizleri hassas bir şekilde tespit edilmiştir.



**Şekil 2.10.** İş akış şeması.



**Şekil 2.11.** Mastersizer 3000.

Daha sonra, taze beton özelliklerini değerlendirmek üzere taze beton yoğunluğu ve yayılma çapı testleri gerçekleştirilmiştir. Sertleşmiş betonun performansını belirlemek için sertleşmiş beton yoğunluğu, ultrases geçiş hızı, basınç dayanımı ve eğilme dayanımı testleri yapılmıştır. Bu testler, 7, 14 ve 28 gün olmak üzere belirlenen zaman aralıklarında gerçekleştirilmiştir.

### **2.2.1. UYPB numunelerinin hazırlanması**

UYPB numunelerinin hazırlanmasında pomza tozu PT, porselen parlatma atığı tozu içerenler PPAT olarak kodlanmıştır. Seis ve ark. (2023) ve Ahmad ve ark. (2024) UYPB referans karışım tasarımı ve üretim süreci referans alınarak üretimler gerçekleştirilmiştir. PT ve PPAT ikameleri yüzde (10-50)% olarak ifade edilmiştir. Örneğin; %10 pomza tozu ikame eden UYPB numunesi (PT10); %10 porselen parlatma atığı tozu ikame eden UYPB numunesi ise (PPAT10) olarak tanımlanmıştır. Tablo 2.10'da UYPB numunelerinin karışım oranları ve içerikleri verilmiştir.

**Tablo 2.10.** UYPB karışımlarının bir metreküpteki karışım içerikleri (kg/m<sup>3</sup>).

|             | Ref    | PT<br>10 | PT<br>20 | PT<br>30 | PT<br>40 | PT<br>50 | PPAT<br>10 | PPAT<br>20 | PPAT<br>30 | PPAT<br>40 | PPAT<br>50 |
|-------------|--------|----------|----------|----------|----------|----------|------------|------------|------------|------------|------------|
| <b>Ç</b>    | 900    | 900      | 900      | 900      | 900      | 900      | 900        | 900        | 900        | 900        | 900        |
| <b>SK</b>   | 1012,5 | 1012,5   | 1012,5   | 1012,5   | 1012,5   | 1012,5   | 1012,5     | 1012,5     | 1012,5     | 1012,5     | 1012,5     |
| <b>SD</b>   | 225    | 202,5    | 180      | 157,5    | 135      | 112,5    | 202,5      | 180        | 157,5      | 135        | 112,5      |
| <b>PT</b>   | 0,00   | 22,5     | 45       | 67,5     | 90       | 112,5    | 0,00       | 0,00       | 0,00       | 0,00       | 0,00       |
| <b>PPAT</b> | 0,00   | 0,00     | 0,00     | 0,00     | 0,00     | 0,00     | 22,5       | 45         | 67,5       | 90         | 112,5      |
| <b>SA</b>   | 40,5   | 40,5     | 40,5     | 40,5     | 40,5     | 40,5     | 40,5       | 40,5       | 40,5       | 40,5       | 40,5       |
| <b>SU</b>   | 200    | 200      | 200      | 200      | 200      | 200      | 200        | 200        | 200        | 200        | 200        |
| <b>ÇL</b>   | 160    | 160      | 160      | 160      | 160      | 160      | 160        | 160        | 160        | 160        | 160        |

Yukarıda içerikleri verilen numunelerin üretiminde, Şekil 2.12’de gösterilen 70 rpm çalışma hızına ve 56 litrelik kapasiteye sahip olan çift motorlu mikser kullanılmıştır.



**Şekil 2.12.** UYPB numunelerinin hazırlandığı mikser.

Tüm kuru malzemeler ilave edilir ve düşük hızda (35 devir/dk) 120 saniye süreyle karıştırılır (Şekil 2.13a). Ardından, su ve süper akışkanlaştırıcı karışımı eklenir ve düşük hızda 300 saniye süreyle karıştırmaya devam edilir (Şekil 2.13b). Karışım haznesinin çeperinde kalan harç kalıntıları, temizlenir ve yüksek hızda (70 devir/dk) 120 saniye daha karıştırma işlemi uygulanır (Şekil 2.13c). Bu süreç sonucunda homojen bir karışım elde edilir (Şekil 2.13d). Son olarak, Bekaert lifi eklenir ve düşük hızda 120 saniye boyunca karıştırma işlemi gerçekleştirilir (Şekil 2.13e).



**Şekil 2.13.** UYPB harçlarının hazırlanması.

Her bir karışımdan, 7, 14 ve 28. günlerde yapılacak olan sertleşmiş beton testleri için 3'er adet numune kalıplara dökülmüştür (Şekil 2.14). Eğilme dayanımı testleri için 40x40x160 mm boyutlarında kiriş numuneler üretilmiştir. Basınç dayanımı testleri için ise eğilme dayanımlarından elde edilen 40x40x160 mm boyutlarındaki numuneler, iki parça halinde basınç dayanımı testleri için hazırlanmıştır.



**Şekil 2.14.** Üretilen UYPB numuneleri.

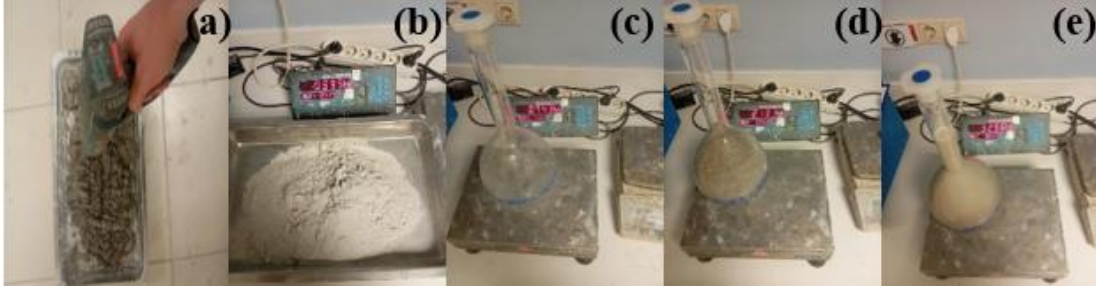
Taze beton numuneleri kalıplara doldurularak 24 saat süreyle kür kabininde muhafaza edilmektedir. Bu sürenin sonunda kalıplarından çıkarılan numuneler, deney tarihine kadar  $20\pm 2^{\circ}\text{C}$  sıcaklıkta ve %95 bağıl nem oranında kür kabininde bekletilmektedir.

### **2.2.2. Pomza ve porselen parlatma atığı tozu için özgül ağırlık deneyi**

Numunenin 1 kilogramlık bir kısmı titizlikle tartılarak alınır ve ardından, malzemenin içindeki suyun etkisi minimize edilerek suyunu tamamen kaybetmeyecek şekilde, suya batırılarak bir gün boyunca bekletilmektedir. Süre sonunda, numune içinde kalan su özenle süzülür ve bir tava içine ince bir tabaka halinde yayılır. Bu aşamada, numunenin ısıtıcı ile kurutulmaması esastır (Şekil 2.15a).

Doygun kuru bir yüzeye ulaşan numune, hassas bir terazi ile tartılarak ağırlığı kaydedilir. Daha sonra, numune etüvde  $105^{\circ}\text{C}$  sıcaklıkta kurutulur (Şekil 2.15b). Kurutma işlemi sonrasında, numune bir desikatör içerisinde oda sıcaklığına getirilir ve piknometre ile tartılarak ağırlığı belirlenir (Şekil 2.15c). Oda sıcaklığına getirilen numune, piknometre içerisine yerleştirilerek tekrar tartılır ve bu değer de kaydedilir (Şekil 2.15d). Numunenin kuru ağırlığı, piknometre ile yapılan tartımdan piknometre ağırlığının çıkarılmasıyla hesaplanmaktadır.

Piknometre, 20 derece Celsius sıcaklıktaki su ile yarı hacme kadar doldurulur. Daha sonra içerisindeki hava kabarcıklarının yüzeye çıkması sağlanır ve düz bir zemine yerleştirilir. Bir saat beklenir ve hacim çizgisine (1 L) kadar suyla tamamlanır ve tartılır (Şekil 2.15e). Bu ağırlıktan, numunenin kuru ağırlığı çıkarılır. Böylece cam ölçü kabı ve içindeki suyun toplam ağırlığı bulunur. Bu süreçte, ASTM C 128 standardı kullanılarak işlem adımları titizlikle uygulanmaktadır.



**Şekil 2.15.** Özgür ağırlık deneyinin yapılışı.

Pomza ve porselen parlatma atığı tozunun görünen özgül ağırlığı ( $\delta_g$ ) (2.1)'de verilen formüllere göre hesaplanmıştır:

$$\delta_g = \frac{M_{kuru}}{M_{(p+s)} + M_{kuru} - M_{(p+n+s)}} \quad (2.1)$$

Burada:

$M_{(p+s)}$  : Piknometre + Su Ağırlığı (gr)

$M_{(p+n+s)}$  : Piknometre + Numune+ Su Ağırlığı (gr)

$M_{kuru}$  : Kuru Numune Ağırlığı (gr)

$\delta_g$  : Görünen Özgül Ağırlık (gr)

Bu bağlamda, UYPB numunelerinin üretiminde bağlayıcı olarak farklı oranlarda silis dumanı ikamesi olarak kullanılan pomza tozu (PT) ve porselen parlatma atığı tozların (PPAT) hesaplanan özgül ağırlıkları Tablo 2.11'de verilmiştir.

**Tablo 2.11.** Pomza ve porselen parlatma atığı tozunun özgül ağırlıkları.

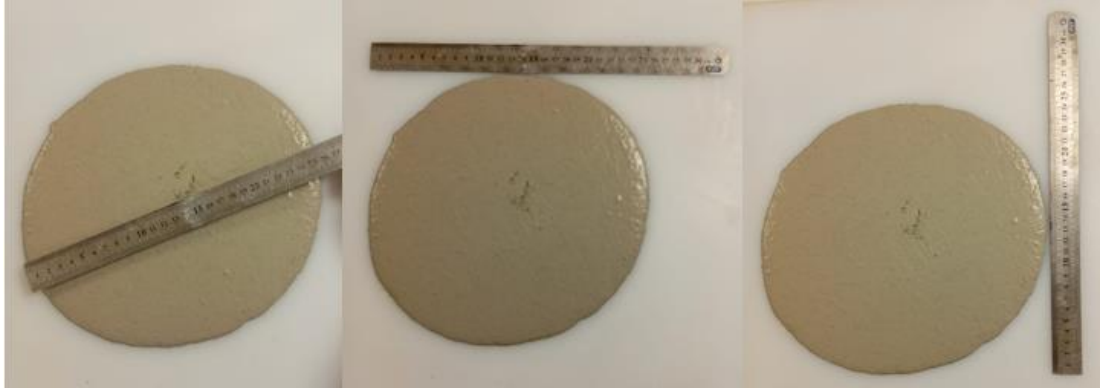
|      |                          |
|------|--------------------------|
| PT   | : 2.47gr/cm <sup>3</sup> |
| PPAT | : 2.52gr/cm <sup>3</sup> |

### 2.2.3. Taze beton deneyleri

#### 2.2.3.1. Taze beton yayılma çapı deneyi

Karışımların hazırlanmasının ardından, taze betonun kıvamını belirlemek için ASTM-C1614/C1614M-05 standardına uygun olarak test edilmiştir. UYPB harç karışımlarının kendiliğinden yayılma özelliğini değerlendirmek amacıyla, betonun kendi ağırlığı altında yayılma çapı ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, 100x100

cm boyutlarındaki yayılma tablası düz bir zemine yerleştirilmiş ve üzerine üst çapı kesik bir koni şeklinde taze beton harcı dökülmüştür (Şekil 2.16). Koni, dik bir şekilde yukarı çekilerek betonun tablaya akması sağlanmıştır.



Şekil 2.16. Taze beton yayılma çapı.

#### 2.2.3.2. Taze beton yoğunluğu deneyi

Taze betonun yoğunluğunun belirlenmesi, TS EN 12350-6 standardı gereğince gerçekleştirilmiştir. Deneyde, bilinen bir hacme ve kütleye sahip rijit ve sızdırmaz bir 1 dm<sup>3</sup> kap içerisine taze beton yerleştirilmiş ve ardından ağırlığı ölçülmüştür (Şekil 2.17). Bu adımlar, standartta belirtilen prosedürler doğrultusunda titizlikle uygulanmıştır (TSE - TS EN 12350-6). Elde edilen veriler, taze betonun yoğunluğunu belirlemek için kullanılmıştır.

Sonuçlar, numuneler için taze beton yoğunluğunun  $D = 1\text{g/dm}^3 = 1\text{kg/m}^3$  olduğunu göstermektedir. Bu değer, standarttaki belirli koşullar altında elde edilmiş ve rapor edilmiştir. Bu yoğunluk ölçümü, betonun işlenme özellikleri ve dayanıklılığı gibi önemli mühendislik özelliklerinin değerlendirilmesinde kullanılan temel bir parametredir.



Şekil 2.17. 1 dm<sup>3</sup>'lük kap.

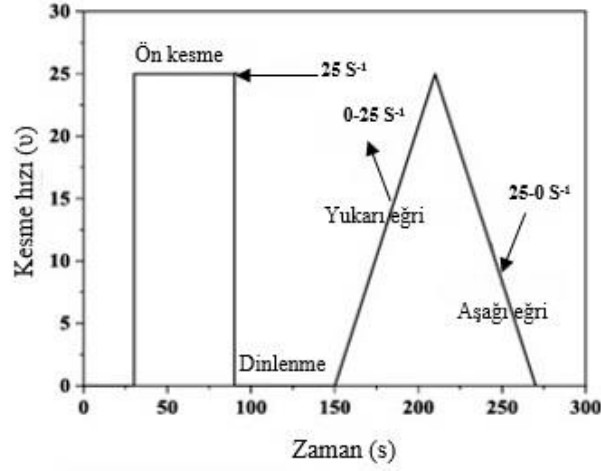
### 2.2.3.3. Reolojik Deneyi

Tez kapsamında üretilen taze beton numunelerinin reometre ölçümleri, Fibrobeton Ar-Ge Merkezi laboratuvarında bulunan RSX SST Reometre cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.18). RSX SST Reometre, AMETEK Brookfield tarafından geliştirilmiş olup, ileri düzey malzeme analizi için tasarlanmış dokunmatik ekranlı bir reometredir. Bu cihaz, eşzamanlı kesme ve uzama akış testleri yapabilme kapasitesine sahip olup, çeşitli malzemelerin benzersiz reolojik davranışlarını keşfetmeye olanak tanır. Reometre, kontrollü kesme hızı (rpm) ve kontrollü gerilim modlarında çalışarak, viskoz veya newtonyen olmayan akışkanların reolojik karakterizasyonunu gerçekleştirebilme yeteneğine sahiptir (RSX SST Rheometer).



**Şekil 2.18.** RSX SST Reometre cihazı.

Dinamik akma gerilmesi ve plastik viskozite, Şekil 2.19'da gösterildiği gibi kayma hızı kontrollü UYPB test reolojisi prosedürü kullanılarak ölçülmüştür. İlk olarak, taze UYPB bulamacı  $25 \text{ s}^{-1}$  sabit kayma hızında 30 s boyunca ölçülür. Son olarak, taze UYPB bulamacı 60 saniye boyunca farklı bir kayma hızı büyüme ve azalma protokolü altında test edilir ve bu oran 0 ila  $25 \text{ s}^{-1}$  arasında değiştirilir.



**Şekil 2.19.** Dinamik akma gerilmesi.

Taze UYPB bulamacı, genellikle Newtonian olmayan karmaşık bir sıvı ile karakterize edilen çok fazlı bir sıvıdır. Normalde, Bingham modeli (Zhao ve ark, 2021) ve Herschel-Bulkley modeli (HB)(Yu ve ark, 2021), akış eğrilerinin bağlantı çizgilerine dayalı olarak çimento, harç veya beton hamurlarının dinamik akma gerilimini karakterize etmek için kullanılır. Kayma gerilimi ( $\tau$ ) ve kayma hızı ( $\dot{\gamma}$ ) sırasıyla Eşitlik (2.2)~(2.4) ile değerlendirilir:

Bingham modeli:

$$\tau = \tau_0 + \mu \dot{\gamma} \quad (2.2)$$

Modifiye edilmiş Bingham modeli:

$$\tau = \tau_0 + \mu \dot{\gamma} + \beta \dot{\gamma}^2 \quad (2.3)$$

Herschel-Bulkley (HB) modeli:

$$\tau = \tau_0 + \omega \dot{\gamma}^n \mu = \frac{3\omega}{n+2\dot{\gamma}} \dot{\gamma}^{\frac{n}{n+2}} \mu^{\frac{n+2}{n+2}} \quad (2.4)$$

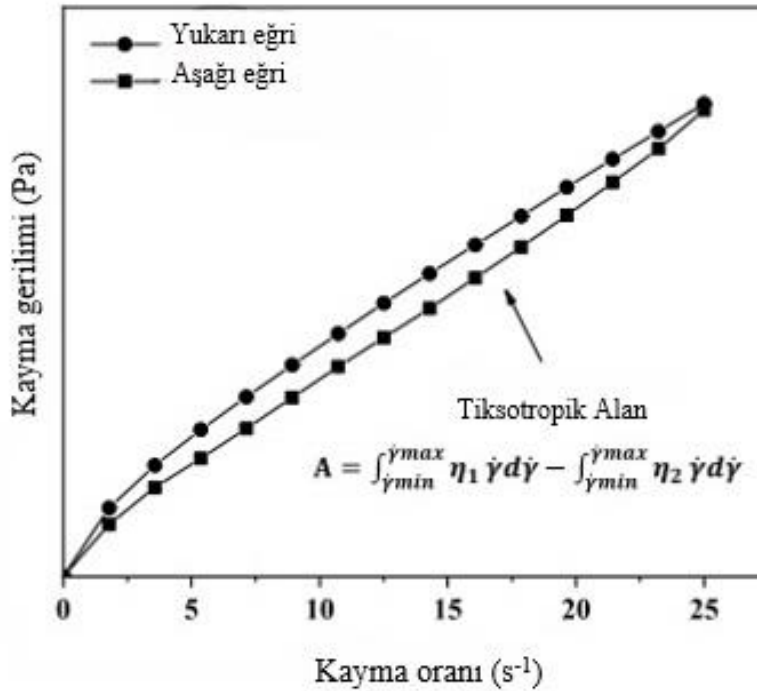
$\tau$  kayma gerilimidir (Pa);  $\tau_0$  dinamik akma gerilimidir (Pa);  $\mu$ , denklem (2.4)'teki  $\mu$ 'nin akademik Ferrais alimlerinin klasik ampirik formülü kullanılarak hesaplandığı plastik viskozitedir (Pa·s) (Hu & De Larrard, 1996);  $\dot{\gamma}$  kayma hızı ( $s^{-1}$ );  $\beta$  bir sabittir (Pa·s<sup>2</sup>);  $\omega$  tutarlılık katsayısıdır (Pa·s<sup>n</sup>), burada  $n = 1$ , Bingham sıvısı için;  $n > 1$ , kayma kalınlaşması için, dilatant sıvı;  $n < 1$ , kayma inceltme için, psödoplastik sıvı.

Tiksotropi, akışkanın kayma veya durgun statik durumdaki mikroyapısal tepkisinde zamanın bir fonksiyonu olan değişim olarak tanımlanır (Qian & Kawashima, 2018). Günümüzde tiksotropiyi ölçmek için en yaygın kullanılan yöntemler, histerezis döngüsü yöntemi ve kayma hızı zayıflaması yöntemidir. Histerezis döngüsü, bir bulamacın tiksotropik davranışını belirlemek için kullanılan geleneksel yöntemlerden biridir. Aynı kayma hızında, bulamacın inişi sırasındaki kayma gerilmesi, çıkışı sırasındaki kayma gerilmesinden daha az olduğunda, bir histerezis çizgisi ortaya çıkar. Şekil 2.20'de gösterildiği gibi bulamacın tiksotropisini karakterize eden kapalı bir kayma gerilmesi döngüsü oluşur (Chen ve ark, 2020).

Verilerden hesaplanan tamamen kapalı tiksotropik döngüsü ile bulamaç yapısının çöküşü karakterize edebilir. Alanı ise eşitlik (2.5) ile hesaplanır:

$$A = \int_{\dot{\gamma}^{\min}}^{\dot{\gamma}^{\max}} \eta_1 \dot{\gamma} d\dot{\gamma} - \int_{\dot{\gamma}^{\min}}^{\dot{\gamma}^{\max}} \eta_2 \dot{\gamma} d\dot{\gamma} \quad (2.5)$$

Burada A tiksotropik döngü alanını;  $\eta_1$  yüksek görünür viskoziteyi (Pa·s);  $\eta_2$  düşük görünür viskoziteyi (Pa·s);  $\dot{\gamma}$  kayma hızını ( $s^{-1}$ ) temsil eder.



Şekil 2.20. Histeretik döngü alanı yöntemi.

#### 2.2.4. Sertleşmiş beton deneyleri

Sertleşmiş beton deneyleri tahribatsız testlerden yoğunluk ve UGH (Ultras ses Geçiş Hızı) deneyleri ile tahribatlı test yöntemlerinden basınç ve eğilme dayanımı deneylerini içermektedir. Bu testler, farklı yaşlarda (7, 14, 28 gün) üç farklı karışım (referans, PT içeren ve PPAT içeren karışımlar) için üçer adet numune üzerinde uygulanmıştır. Elde edilen ölçümlerin aritmetik ortalaması, her test için sonuçların belirlenmesinde kullanılmıştır.

Eğilme dayanımı numuneleri 40x40x160 mm boyutlarında dökülmüştür. Basınç dayanımı testleri için ise eğilme dayanımı testlerinden elde edilen numunelerin 40x40x160 mm boyutlarındaki parçalara bölünmüş ve her bir parça üzerinde basınç dayanımı testleri gerçekleştirilmiştir.

##### 2.2.4.1. Sertleşmiş beton yoğunluğu deneyi

Sertleşmemiş betonların yoğunluk değerleri 28. gün deney numunelerinin ölçümleri, TS EN 12390-7 standardına uygun olarak denklem 2.6'da belirtilen formül kullanılarak hesaplanmıştır (Şekil 2.21).

$$D = \frac{M}{V} \quad (2.6)$$

Burada:

D: Sertleşmiş betonun yoğunluğu (kg/m<sup>3</sup>),

M: Numune kütlesi (kg),

V: prizma numune hacmi (m<sup>3</sup>) şeklinde tanımlanır. (Her bir numunenin hacmi, kumpas kullanılarak ölçülerek hesaplanmıştır).

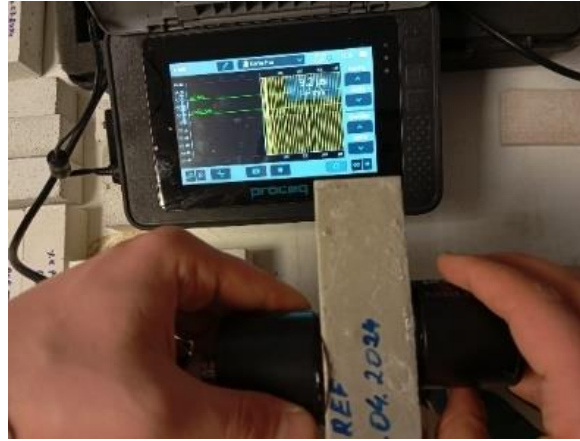
Bu formül, betonun yoğunluk değerlerini, numunelerin kütlesi ve hacmi arasındaki ilişkiyi temel alarak belirlemektedir. Bu hesaplama, betonun sertleşmemiş halinin yoğunluğunu TS EN 12390-7'ye uygun olarak tespit edilmiştir (BS EN 12390-7).



**Şekil 2.21.** UYPB numunelerinin ağırlık ve boyut ölçümleri.

#### 2.2.4.2. Ultrases geçiş hızı (UGH) deneyi

Tüm karışımlardan elde edilen numunelerin ultrasonik geçiş hızlarını belirlemek amacıyla, ASTM C597 standardına uygun olarak 2.7'deki eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır. Pundit Lab ve Ultrasonik Dalga Hızı Test Cihazı kullanılarak Ultrasonik Geçiş Hızı (UGH) testleri gerçekleştirilmiştir. Bu testlerde, 40x40x160 mm boyutlarındaki hazırlanan numuneler deney günlerine kadar kür kabini bekletilmiş ve 7., 14., ve 28. günlük ultrases geçiş hızları kilometre/saniye cinsinden ölçülmüştür (Şekil 2.22).



**Şekil 2.22.** Ultrases geçiş hızı ölçümü.

Bu süreç, beton numunelerin ultrasonik özelliklerini belirlemek ve malzemenin dayanıklılığı ve homojenliği hakkında bilgi edinmek için uygulanmıştır. ASTM C597 standardı, beton numunelerin ultrasonik geçiş hızlarının belirlenmesi için

geliştirilmiş bir yöntemdir. Bu yöntem, yapı malzemelerinin karakterizasyonunda yaygın olarak kullanılmaktadır. Elde edilen sonuçlar, beton numunelerin mekanik özelliklerini değerlendirmek ve yapısal tasarımda kullanılmak üzere analiz edilmektedir.

$$V = \frac{L}{T} \quad (2.7)$$

Burada:

V: Geçiş hızı, (m/s)

L: Dönüştürücü yüzeylerinin merkezleri arasındaki mesafe, (m)

T: Geçiş süresi, (s)

#### 2.2.4.3. Eğilme dayanımı deneyi

Eğilme dayanımı testi, 40x40x160 mm boyutlarındaki kiriş numuneler üzerinde Fibrobeton Ar-Ge merkezi labında mevcut bulunan UTEST marka, 30.000 kN kapasiteli ve 0,05 MPa/s yükleme hızına sahip özel bir cihaz kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.23).



Şekil 2.23. Eğilme dayanım deneyi.

Eğilme dayanımları 2.8'deki verilen denklem kullanılarak hesaplanmıştır. Prizma numuneler kırılıncaya kadar yükleme yapılmış ve maksimum yük belirlenmiştir. Her bir grup için üç adet numune hazırlanmış ve yükleme hızı 0,05 MPa/s yük kontrollü dayanım uygulanarak üç noktalı eğilme dayanımı hesaplanmıştır.

$$R_f = \frac{1,5 \times F_f \times l}{b^3} \quad (2.8)$$

Burada;

$R_f$  :Eğilme dayanımı (MPa).

$b^3$  :Kare yan kesitin ve prizmanın mm cinsinden boyutu.

$F_f$  :Kırılma bölgesinde prizmanın merkezine uygulanan yük (N)

$l$  :mm cinsinden destekler arası mesafe.

#### 2.2.4.4. Basınç dayanımı deneyi

Basınç dayanımı testi, Fibrobeton Ar-Ge merkezinde bulunan UTEST marka cihaz (Şekil 2.24) kullanılmış ve 2.9’da denkleme göre hesaplanmıştır.

Test için, eğilme dayanımı testi için 40x40x160 mm boyutlarında kiriş numuneleri dökülmüştür (TS EN 196-1 (2016)). Elde edilen, iki parça üzerinde basınç dayanımı testleri gerçekleştirilmiştir. Basınç dayanımı testi cihazın 40x40 mm ve yüksekliği 40 mm olan kırılan parçalara  $2,4 \pm 0,2$  kN/s yükleme hızıyla numune kırılma yükü bulunmuştur.

$$R_c = \frac{F_c}{1600} \quad (2.9)$$

$R_c$  :Megapaskal cinsinden basınç dayanımıdır

$F_c$  :Newton cinsinden kırılma anındaki maksimum yüküdür

1600 - milimetre kare cinsinden merdanelerin veya yardımcı plakaların (40 mm × 40 mm) alanıdır.



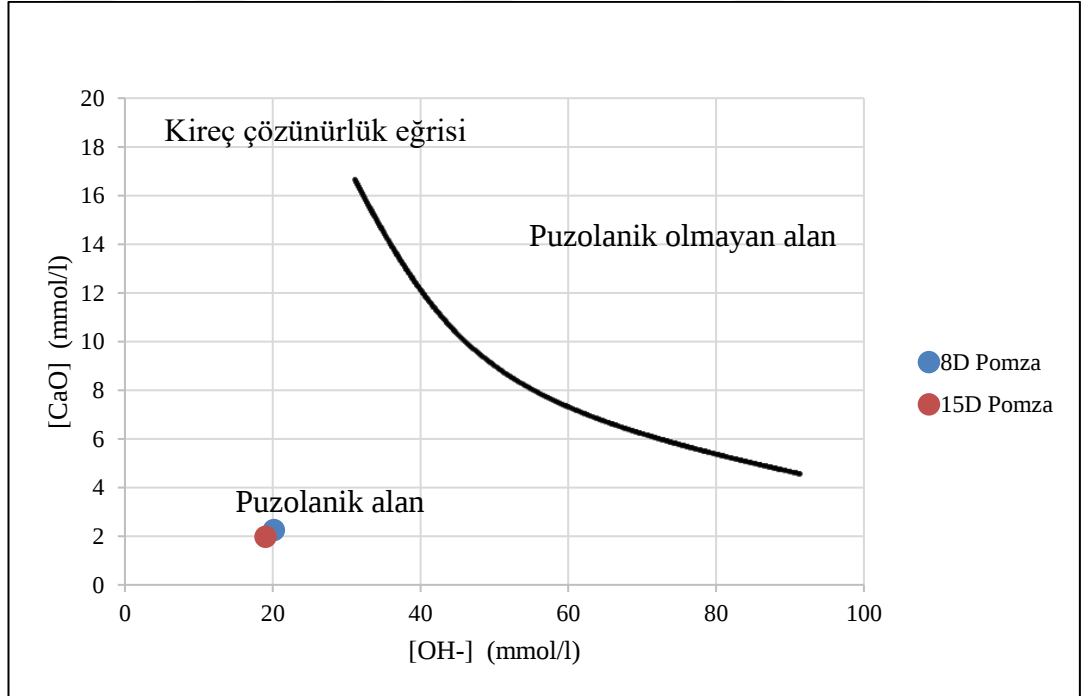
Şekil 2.24. Basınç dayanım deneyi

### 3. BULGULAR VE TARTIŞMA

#### 3.1. Hammadde Testleri

##### 3.1.1. Pomza ve porselen parlatma atığı tozunun puzolanik aktivite analizleri

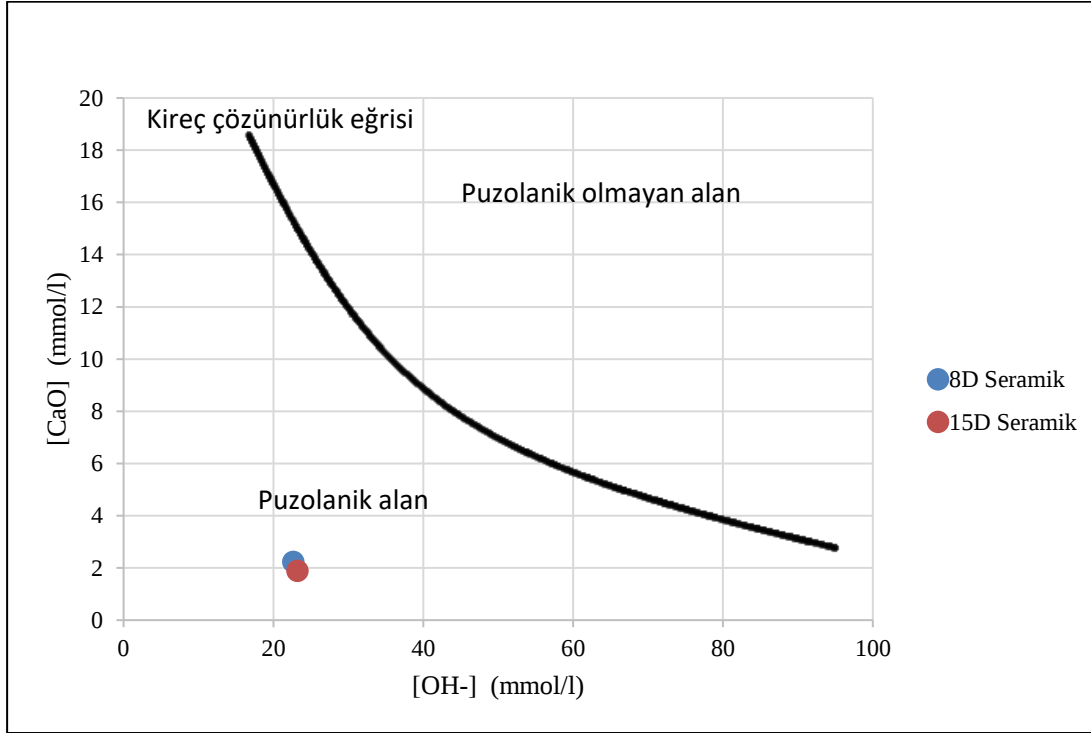
Puzolanik aktivite, kireç ve su karışımının alkali ortamında puzolan özellikli bir maddenin kimyasal reaksiyona girerek bağlayıcılık özelliği kazanmasıdır. Bu aktivite, puzolanın kalsiyum hidroksitle reaksiyona girerek suya çözünmeyen bileşikler oluşturması ve kirecin bağlayıcılık özelliklerini artırması sürecini ifade eder. Puzolanlar, genellikle doğal veya yapay olarak elde edilir ve puzolanik aktivite kimyasal ve fiziksel testlerle belirlenebilir (Jubera-Pérez ve ark, 2024; Šídlová ve ark, 2023). Bu aktivite, yapı malzemelerinin dayanımını artırmak için kullanılan önemli bir özelliktir. Bu deneyde, titrasyon işlemi kullanılarak elde edilen CaO ve OH<sup>-</sup> konsantrasyonu, kireç aktivitesi eğrisiyle ilişkilendirilerek analiz edilmiştir (Şekil 3.1).



Şekil 3.1. Basınç dayanım deneyi

Bu deneyde, titrasyon işlemi kullanılarak elde edilen CaO ve OH<sup>-</sup> konsantrasyonu, kireç aktivitesi eğrisiyle ilişkilendirilerek analiz edilmiştir (BS EN 196-5:2014).

Şekilde görüldüğü üzere, pomza tozu için CaO ve OH<sup>-</sup> ortalaması tekrarlanabilirlik değerleri; 8 gün sonra sırasıyla 2,24 ve 20,14 mmol/l; 15 gün sonra ise sırasıyla 1,96 ve 19,03 mmol/l olarak belirlenmiştir. Bu nokta, puzolanik aktivite gösteren kireç aktivitesi eğrisinin altında yer almaktadır. OH<sup>-</sup> ve CaO için standart sapmalar ise 8 gün sonra sırasıyla 0,68 ve 0,13 mmol/l; 15 gün sonra ise sırasıyla 0,82 ve 0,10 olarak hesaplanmıştır. Porselen parlatma atığı tozunun puzolanik aktivite grafiği Şekil 3.2’de verilmiştir.



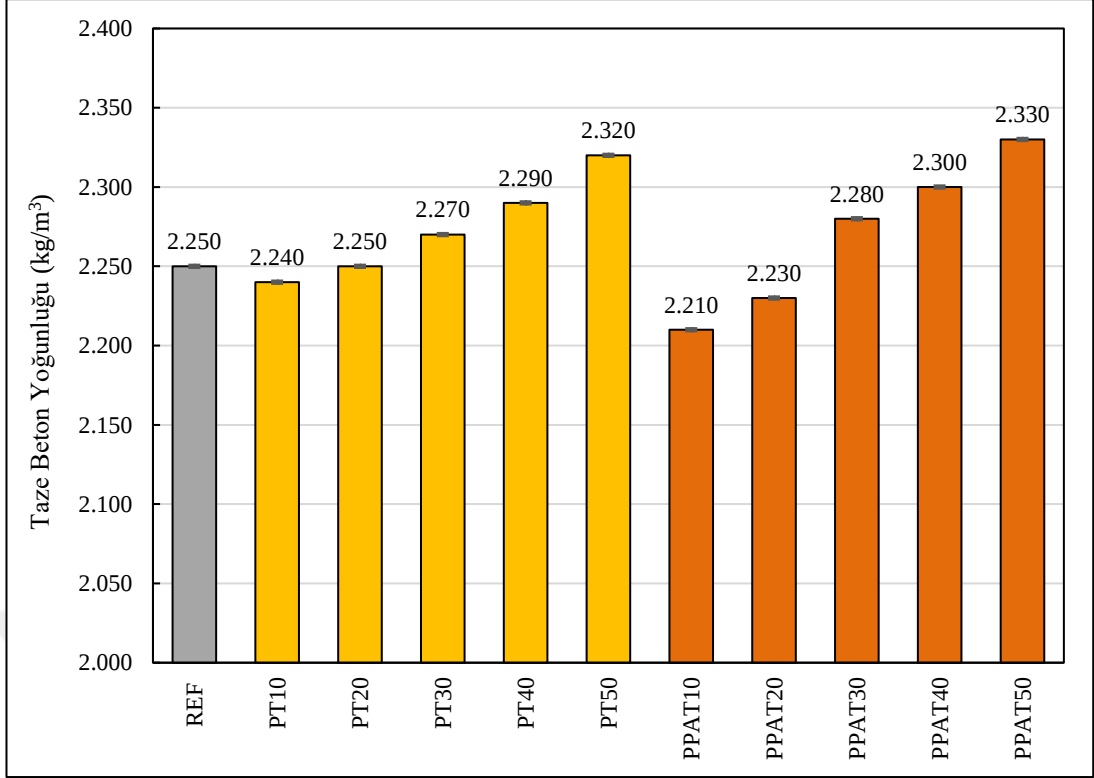
**Şekil 3.2.** Porselen parlatma atığı tozunun puzolanik aktivitesi.

Şekilde görüldüğü gibi, Porselen parlatma atığı tozu için CaO ve OH<sup>-</sup> ortalama tekrarlanabilirlik değerleri; 8 gün sonra sırasıyla 2,23 ve 22,69 mmol/l; 15 gün sonra ise sırasıyla 1,88 ve 23,24 mmol/l olarak belirlenmiştir. Bu nokta, puzolanik aktivite gösteren kireç aktivitesi eğrisinin altında yer almaktadır. OH<sup>-</sup> ve CaO için standart sapmalar ise 15 gün sonra porselen parlatma atığı için sırasıyla 0,313 ve 0,039 mmol/l olarak ölçülmüştür. Elde edilen bu değerler, BS EN 196-5 standartlarında belirtilen 0,5 ve 0,2 mmol/l sınırları içinde hesaplanmıştır.

### 3.2. Taze Beton Deneyleri

#### 3.2.1. Taze beton yoğunluğu

Artan oranlarda PT ve PPAT puzonalik malzemelerini içeren numunelerinin yoğunluk değerleri (Şekil 3.3) verilmiştir.

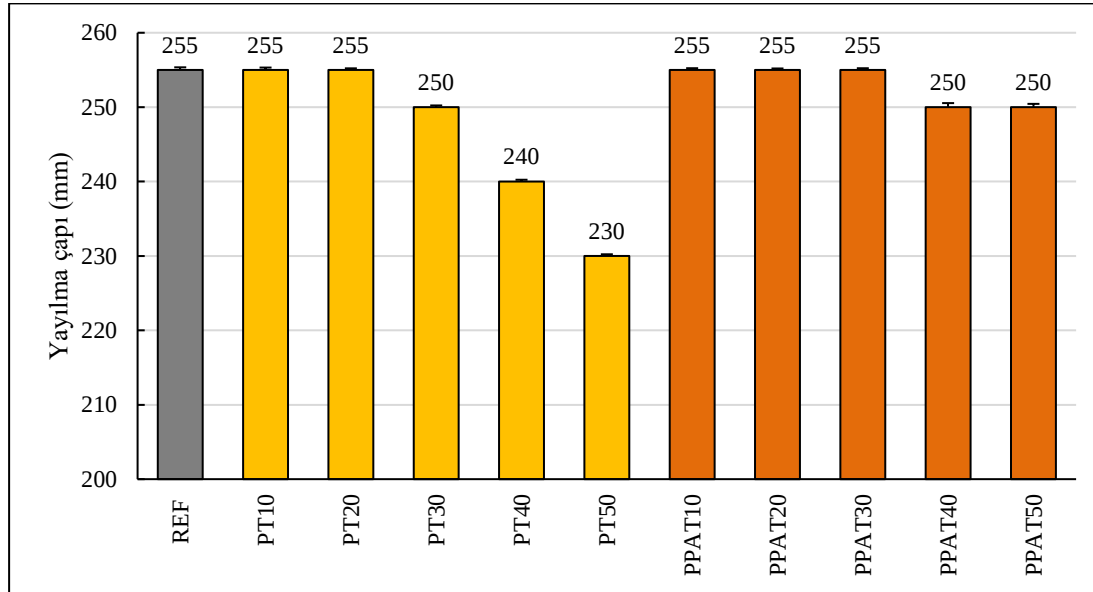


**Şekil 3.3.** Taze beton yoğunluğu.

Yoğunluk değeri  $2250 \text{ kg/m}^3$  olan referans numunesi ile %10,0 pomza tozu (PT) ve %10,0 porselen parlatma atığı tozu (PPAT) içeren taze beton numuneleri karşılaştırıldığında, sırasıyla %0,44 ve %1,70 oranlarında bir azalma gözlemlenmiş, yoğunluk değerleri  $2240 \text{ kg/m}^3$  ve  $2210 \text{ kg/m}^3$  olarak ölçülmüştür. Artan puzolanik madde miktarları, her iki taze beton numunesinin yoğunluk değerlerinde doğru orantılı bir artışa neden olmuştur. PT ve PPAT puzolanik malzemeleri kıyaslandığında, PPAT içeren taze beton numunelerinin yoğunluk değerlerindeki artışın %30 ikame oranına kadar daha az olduğu belirlenmiştir. Yapılan hesaplamalar sonucunda, %20,0 ikame oranında yoğunluk değerleri sırasıyla  $2250 \text{ kg/m}^3$  ve  $2230 \text{ kg/m}^3$ ; %30,0 ikame oranında ise  $2270 \text{ kg/m}^3$  ve  $2280 \text{ kg/m}^3$  olarak tespit edilmiştir. %40,0 ve %50,0 ikame oranlarında PPAT puzolanik malzeme içeren taze betonun yoğunluk değerlerindeki artışın, PT içerenlere kıyasla sırasıyla %0,43 oranında daha fazla olduğu belirlenmiştir. %40,0 ve %50,0 ikame oranlarında PT içeren numunelerin yoğunluk değerleri sırasıyla  $2290 \text{ kg/m}^3$  ve  $2300 \text{ kg/m}^3$  olarak ölçülmüştür, PPAT içeren numunelerde ise  $2320 \text{ kg/m}^3$  ve  $2330 \text{ kg/m}^3$  olarak belirlenmiştir.

### 3.2.2. Yayılma çapı

Farklı oranlarda PT ve PPAT puzonalik malzemelerini içeren UYPB numunelerinin taze beton yayılma çapı ölçümleri Şekil 3.4'te görülmektedir.



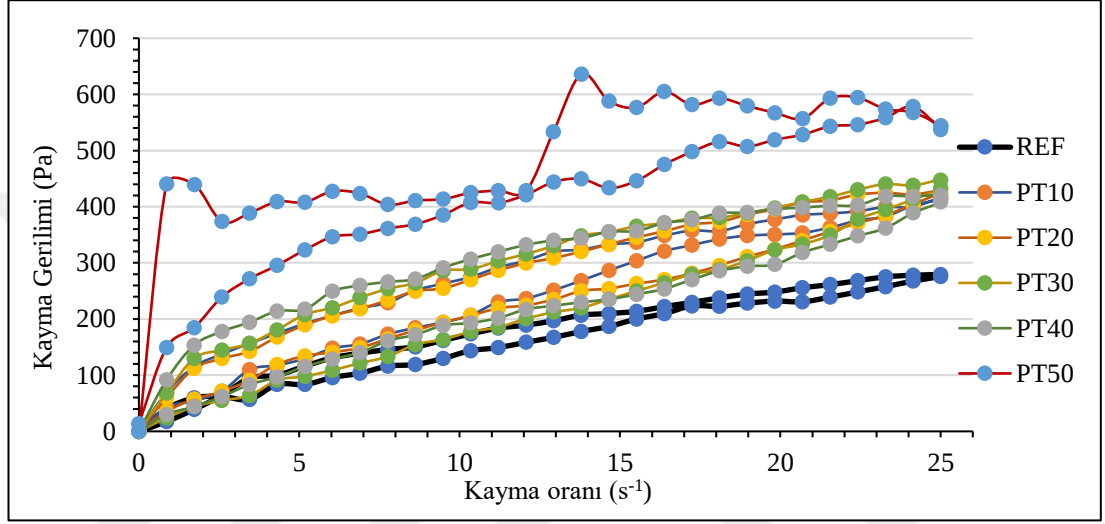
Şekil 3.4. Yayılma çapı testi.

Yapılan ölçümler neticesinde, %20' ye kadar PT ve PPAT içeren beton numunelerinin yayılma çapı 255 mm olarak belirlenmiştir. Aynı oranda PT ve PPAT'nin yer aldığı %30 oranında ikame edilen UYPB harç numunesi ile, aynı oranda PPAT ikamesi yapılan harç numunesi arasında %2,00 oranında bir farkla, sırasıyla 250 mm ve 255 mm çapları ölçülmüştür. %40 oranında PT ve PPAT içeren numunelerde ise sırasıyla 240 mm ve 250 mm çapları tespit edilmiştir. Karşılaştırma yapıldığında, PT içeren taze beton numunesi aynı oranda PPAT içeren numuneye göre % 4,16 daha az yayılım sergilemiştir. %50 oranlarında ikamede, bu oran PT içeren numune için aynı oranda PPAT içeren numuneye göre % 8,69 daha az yayılım göstererek, sırasıyla 230 mm ve 250 mm çapları belirlenmiştir. Her iki malzeme kullanımında %30 ikame oranlarına kadar kıvam kaybı yaşanmamış olması ve ileri düzeylerdeki ikame oranlarında dahi hala yeterli akışkanlığa sahip karışımların elde edilmesi bu puzolanik malzemelerin UYPB karışımlarında %50 ikame oranlarına kadar kullanılmasının uygun olduğunun bir göstergesidir.

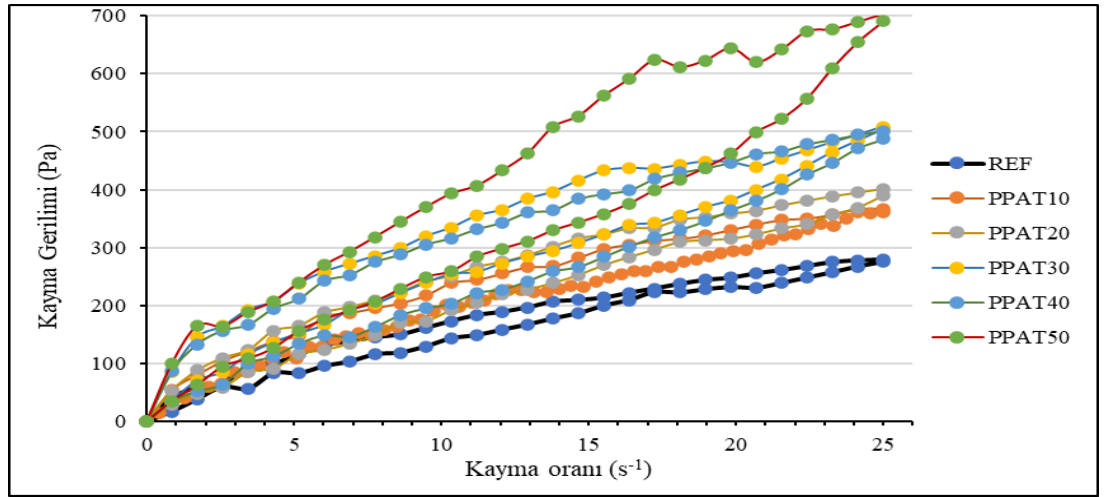
### 3.2.3. Reolojik Deneyi

#### 3.2.3.1. Dinamik akma gerilimi ve plastik viskozite

Bu çalışmada UYPB'nun taze özellikleri üzerindeki etkisini daha da netleştirmek için bir dizi reolojik test yapılmıştır (Şekil 3.5 ve 3.6). Dinamik akma gerilmesi, bulamacın akışını durdurmak için gereken gerilmedir. Plastik viskozite, akışı engelleyen ve bulamaç sisteminin deformasyon hızına tepki veren bulamacın iç yapısının bir özelliğidir (Keke ve ark, 2022).



Şekil 3.5. Pomza tozu içeren taze beton numunelerinin dinamik akma gerilim ve plastik viskoziteleri.



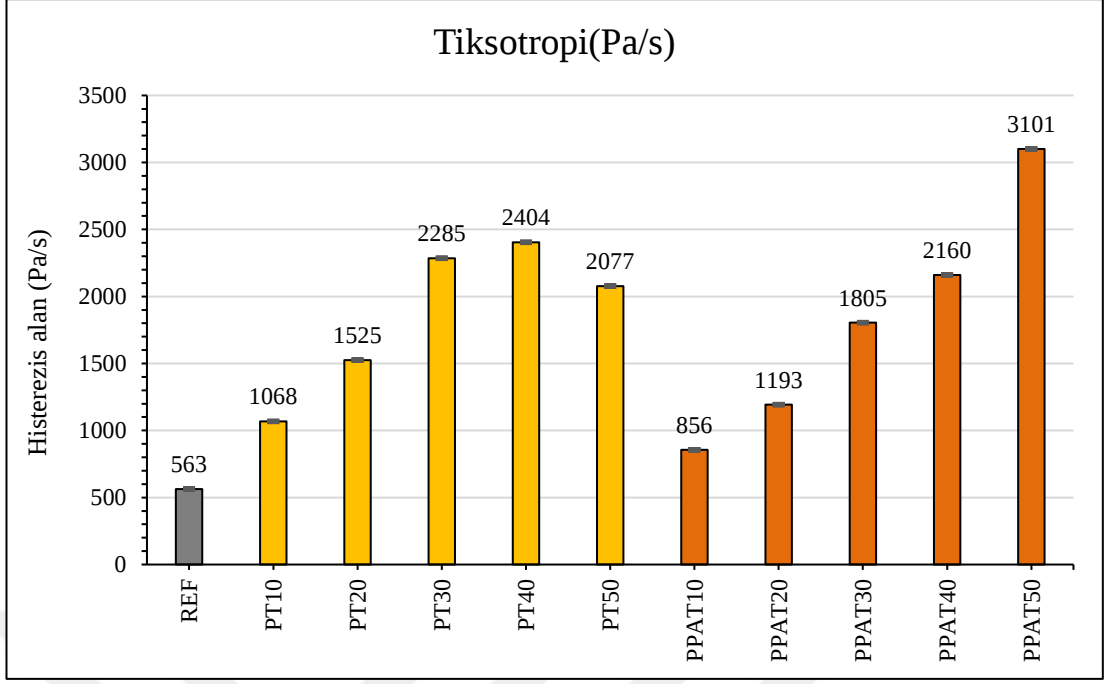
Şekil 3.6. Porselen parlatma atığı tozu içeren taze beton numunelerinin dinamik akma gerilim ve plastik viskoziteleri.

Eşik kayma gerilmesi, bir viskoelastik malzemenin plastik şekil değişimini başlatmak için ihtiyaç duyduğu kayma gerilmesi olarak tanımlanır. Bu, malzemenin hareketsiz kaldığı ancak bu değerin ötesinde akmaya veya şekil değiştirmeye başlayacağı

maksimum kayma gerilmesidir (G. Lu & Wang, 2010). PT matrisinin daha düşük eşik kayma gerilmesi, akışı başlatmak için daha az gerilme gerektirir ve bu genellikle daha yüksek çökme akışına karşılık gelir. PPAT içeren taze betonun grafikleri, daha yüksek eşik kayma gerilmesi ve daha düşük plastik viskoziteye işaret ediyor. Bu, akış başlatma için daha yüksek gerilmelere ihtiyaç duyulduğunu ve matrisin akışının daha az plastik viskoziteye bağlı olduğunu gösteriyor. PT matrisi, ağırlığı eşik kayma gerilmesinden daha düşük olduğunda akışı durdurur (E. H. Yang ve ark, 2009). Matris eşik kayma gerilmesi değerini aştığında, plastik viskozite PT matrisinin akışını kontrol eder ve matrisin stabilitesini korumak için yeterince yüksek olmalıdır. Her iki durumda da, liflerin homojen dağılımını sağlamak için matrisin viskozitesinin kritik öneme sahip olduğu belirtilmektedir. Optimum bir aralık içinde daha yüksek kayma hızı, liflerin homojen dağılımını kolaylaştırır (M. Li & Li, 2013). Ancak, plastik viskozite ve kayma gerilmesi çok yüksek olduğunda, daha büyük boyutlu ve sıkışmış hava gözenekleri ortaya çıkar. Bu durum, net kesit alanının azalması ve lif topaklarının oluşması ile sonuçlanarak lif dağılım derecesinin düşmesine yol açar. Sonuç olarak, lif eklemenden önce harç matrisinin reolojik özelliklerinin kontrol edilmesi, yüksek mekanik performans elde etmek için kritik öneme sahiptir.

### **3.2.3.2. Tiksotropi değerleri**

Kapalı histerezis döngüsü, UYPB'nun tiksotropisini değerlendirmek için kullanılabilir. Spesifik performans, kesme işleminin güçlenmesinin ağ yapısının ve partiküller arası moleküler kuvvetin yok olmasına yol açması ve kesme işleminin zayıflamasının jel yapısının kademeli olarak iyileşmesine neden olmasıdır (Ren ve ark, 2021). Tiksotropi, bir maddenin viskozitesinin zaman içinde azalması ve ardından tekrar eski haline dönmesi olasılığını ifade eder. Bu özellik, jellerin veya sıvıların akış davranışını değerlendirmek için sıklıkla kullanılır (Y.C.Wu ve ark, 2024). Şekil 3.7'de PT ve PPAT ikameli taze beton numunelerinin tiksotropi değerlerini göstermektedir.



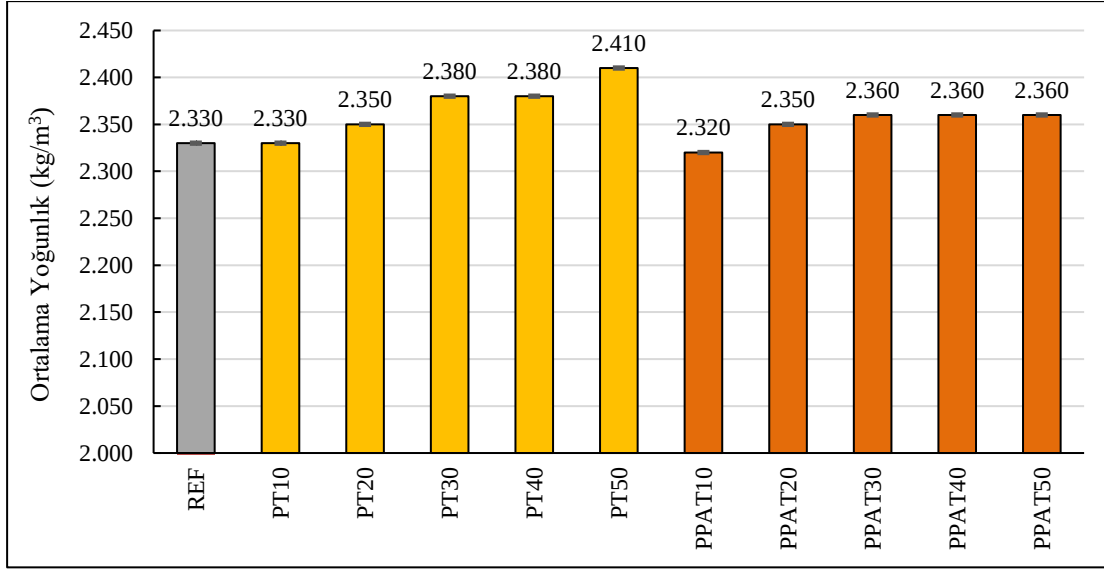
**Şekil 3.7.** PT ve PPAT ikameli taze beton numunelerinin tiksotropik davranışları.

Şekil 3.9'daki grafik pomza tozu (PT) ve porselen parlatma tozu atığı (PPAT) ikameli taze beton örneklerinin tiksotropik değerlerini göstermektedir. Referans örneğin (REF) tiksotropi değeri 563 Pa/s olarak belirlenmiştir. PT ikamesi ile tiksotropi değerlerinin %10'dan %50'ye kadar sırasıyla 1068 Pa/s, 1525 Pa/s, 2285 Pa/s, 2404 Pa/s ve 2077 Pa/s olduğu tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, pomza tozu ikame oranı arttıkça tiksotropi değerlerinin önemli ölçüde arttığını, ancak %50 ikame oranında bir azalma eğilimi sergilendiğini göstermektedir. Aynı şekilde, PPAT ikamesi ile tiksotropi değerlerinin %10'dan %50'ye kadar sırasıyla 856 Pa/s, 1193 Pa/s, 1805 Pa/s, 2160 Pa/s ve 3101 Pa/s olarak kaydedildiği görülmüştür. Bu veriler, porselen parlatma tozu atığının tiksotropiyi artırmada etkili olduğunu ve %50 ikame oranında en yüksek değere ulaştığını ortaya koymaktadır. Sonuç olarak, her iki katkı malzemesinin de taze betonun reolojik özelliklerini iyileştirdiği, ancak ikame oranlarının dikkatlice optimize edilmesi gerektiği belirlenmiştir.

### 3.3. Sertleşmiş Beton Testleri

#### 3.3.1. Sertleşmiş beton yoğunluğu

Farklı oranlarda pomza tozu ve porselen parlatma atığı tozu içeren UYPB numunelerine ait karşılaştırmalı sertleşmiş beton yoğunluk ölçümleri Şekil 3.8'de verilmiştir.



**Şekil 3.8.** Sertleşmiş beton yoğunluk değerleri.

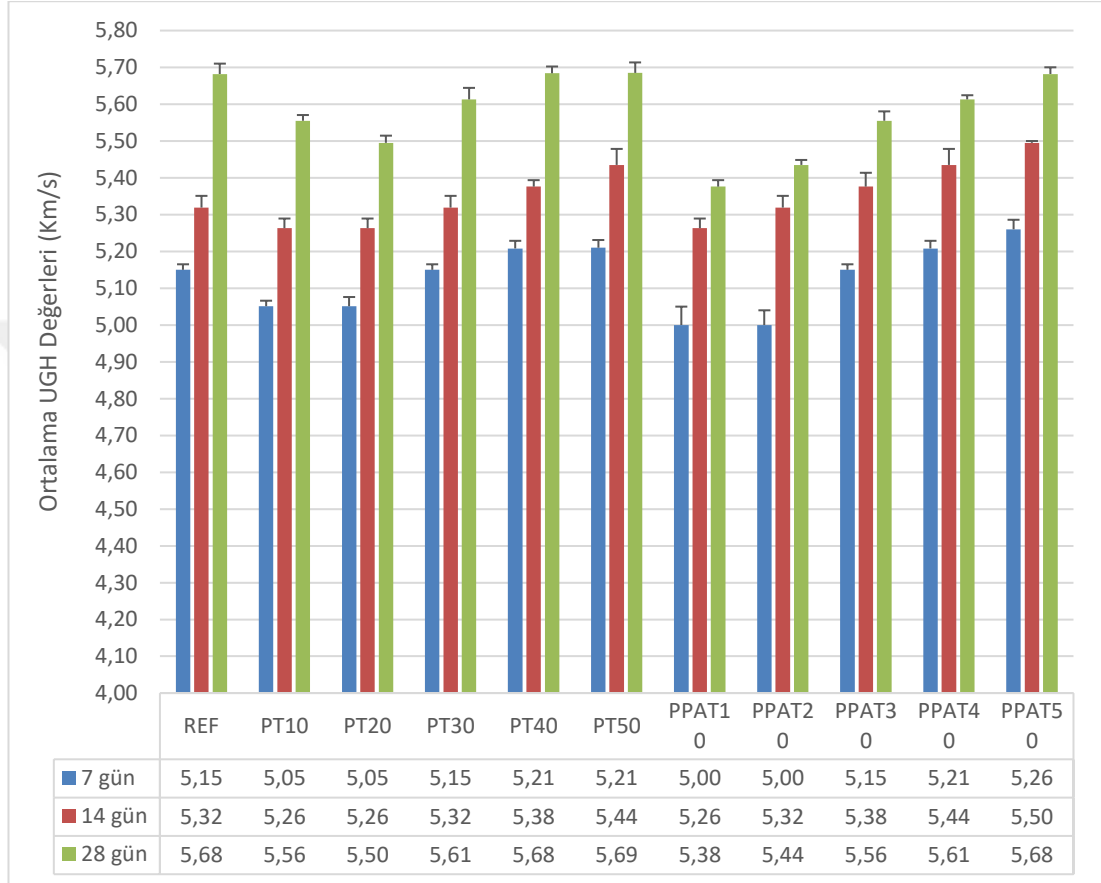
Çeşitli karışım kodlarına sahip beton numunelerinin ortalama yoğunlukları 28 gün boyunca ölçülmüştür. Karışım kodlarına göre yoğunluk değerleri incelendiğinde, pomza tozu (PT) içeren karışımlarda genellikle pomza tozu içeriğinin artmasıyla birlikte yoğunluğun arttığı gözlemlenmektedir. Örneğin, PT10'dan PT50'ye doğru ilerlerken, pomza tozu içeriğindeki artışa paralel olarak ortalama yoğunluk değerlerinde genel bir artış meydana gelmektedir.

Öte yandan, PPAT içeren karışımlarda, yoğunluk değerleri belirli bir oranda değişiklik göstermektedir. Özellikle, PPAT20'den PPAT30'a geçişte ve PPAT30'dan PPAT40'a geçişte bir artış gözlemlenmektedir. Ancak, PPAT40 ve PPAT50 arasında yoğunluk değerlerinde dikkate değer bir farklılık gözlenmemektedir. Beton karışımlarında kullanılan farklı malzemelerin yoğunluk üzerindeki etkilerini açığa çıkarmaktadır. Pomza tozu içeriğinin artması genellikle yoğunluğun artışıyla ilişkilendirilirken, porselen parlatma atığı tozu içeriğindeki artışın yoğunluk üzerinde daha karmaşık bir etkisi olduğu görülmektedir. Karışım kodlarına göre, malzemenin 28. günlerdeki yoğunluk değişimlerine bakıldığında, genel olarak belirli bir eğilim gözlemlenmektedir.

### 3.3.2. Ultrases geçiş hızı

Farklı oranlarda PPAT ve PT puzolanik malzemeleri içeren UYPB numunelerinin ultrases geçiş hızı ölçümleri Şekil 3.19'da verilmiştir.

Grafikteki genel eğilimin, beton numunelerinin yaşlandıkça ultrasonik geçiş hızlarının arttığı yönünde olduğu görülmektedir. Örneğin, 7 günlük değerler genellikle 28 günlük değerlere göre daha düşüktür, bu da betonun zamanla dayanım kazandığını, hidrasyonun devam ettiğini ve hidrate ürünlerin artışı nedeniyle yoğunlaştığını yansıtmaktadır.



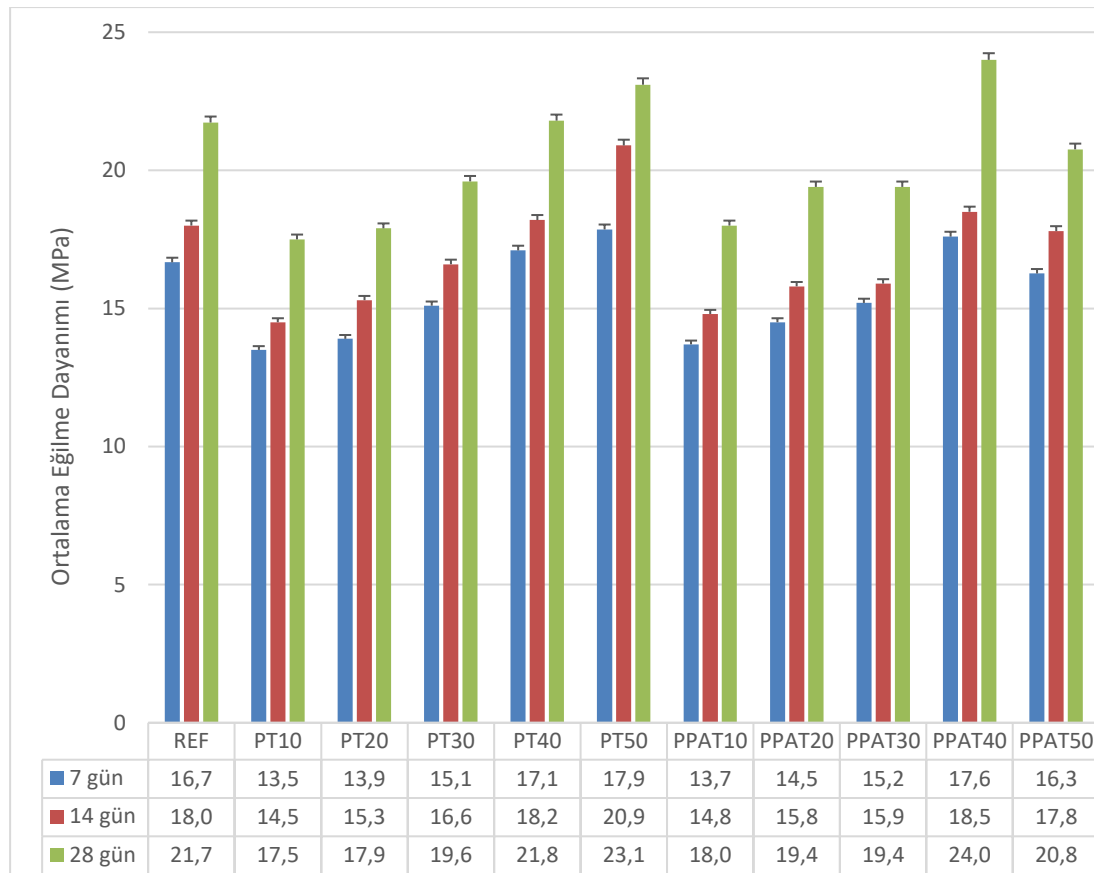
Şekil 3.9. Ultrases geçiş hızı.

### 3.3.3. Eğilme dayanımı

Farklı oranlarda pomza ve porselen parlatma atığı tozu içeren UYPB numunelerinin eğilme dayanımı grafiği Şekil 3.10'da verilmiştir.

Referans karışım 7 günde 16,7 MPa, 14 günde 18,0 MPa ve 28 günde 21,7 MPa eğilme dayanımı sergiler. Pomza tozu (PT) içeren karışımlar da PT10, PT20, PT30, PT40 ve PT50 üç yaş boyunca 13,5 MPa ila 23,1 MPa arasında değişen eğilme mukavemetleri göstermektedir. Eğilme dayanımı genellikle karışımdaki pomza tozu oranıyla birlikte artmaktadır. Porselen parlatma atığı tozu (PPAT) içeren PPAT10, PPAT20, PPAT30, PPAT40 ve PPAT50 karışımları, üç yaş boyunca 13,7 MPa ila 24,0 MPa arasında değişen eğilme dayanımları sergilemektedir. Eğilme dayanımı da karışımdaki porselen

parlatma atığı tozu oranıyla birlikte artma eğilimindedir. Tüm karışımların eğilme dayanımı değerleri basınç dayanımında olduğu gibi zamana bağlı olarak artmıştır. Bu da betonun zamanla dayanım kazandığını ve hidratasyonun sürdüğünü gösterir. Referans karışım, pomza tozu ve porselen parlatma atığı tozu karışımlarına kıyasla genellikle daha yüksek eğilme dayanımları sergilemektedir. Bununla birlikte, pomza tozu ve porselen parlatma atığı tozu karışımlarının eğilme mukavemeti, karışımdaki bu katkı maddelerinin ikame oranı ile artmaktadır. 28 günlük kür süresi ardından PT40, PT50 ve PPAT40 serilerinin eğilme dayanımı değerleri referans numuneye oranla daha yüksek çıkmıştır.

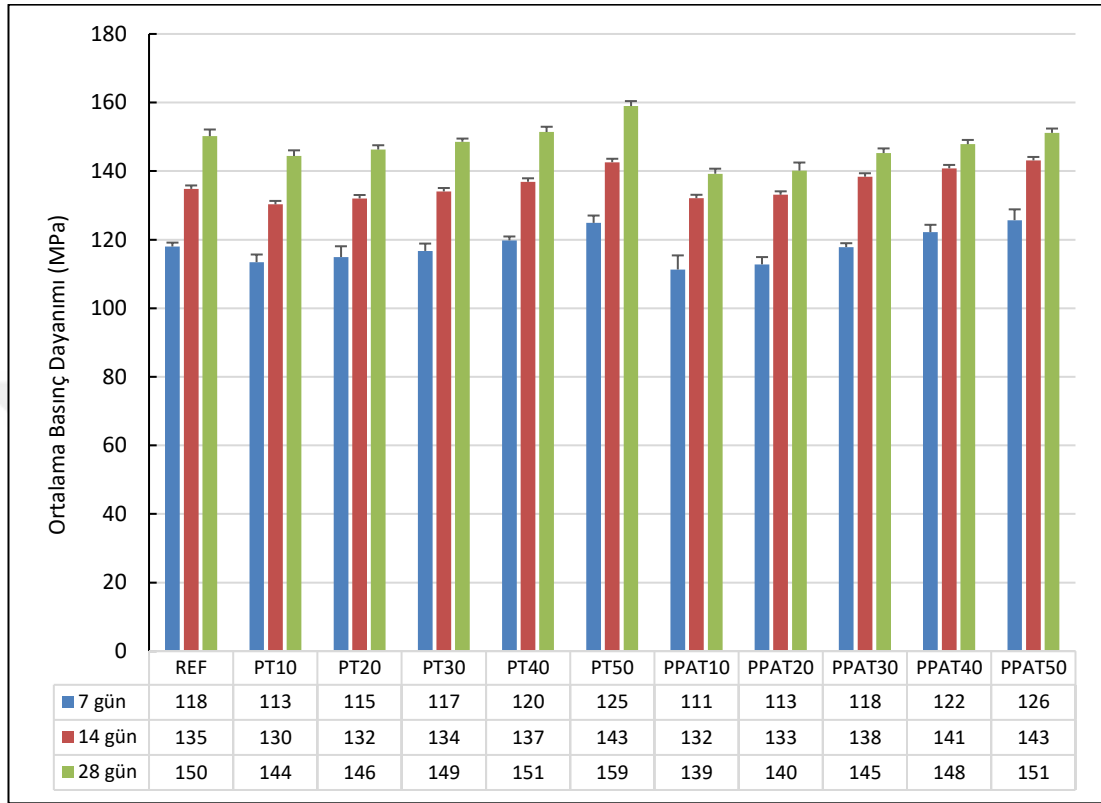


**Şekil 3.10.** Eğilme dayanımı.

Özet olarak, veriler beton karışımlarının eğilme dayanımının kür süresiyle birlikte arttığını ve pomza tozu ve porselen parlatma atığı tozu gibi katkı maddelerinin ikame oranının eğilme dayanımını etkilediğini göstermektedir.

### 3.3.4. Basınç dayanımı

Pomza tozu (PT) ve porselen parlatma atığı tozu (PPAT) ile ikameli ultra yüksek performanslı beton (UYPB) numunelerinin basınç dayanımları Şekil 3.11'deki grafikte verilmiştir.



Şekil 3.11. Basınç dayanımı

Numunelerin 7, 14 ve 28 günlük ortalama basınç dayanımlarını gösteren bu grafik incelendiğinde. Referans karışımın 7, 14 ve 28 günlük basınç dayanımları sırasıyla 118 MPa, 135 MPa ve 150 MPa'dır. %10 ila %50 aralığında pomza tozu (PT) içeren PT10, PT20, PT30, PT40 ve PT50 karışımlarının basınç dayanımları, referans karışıma kıyasla daha düşüktür, ancak 28 günlük dayanımları 144 MPa ile 159 MPa arasında değişmektedir. Pomza tozu oranı arttıkça, basınç dayanımı da artmaktadır. Porselen parlatma atığı tozu (PPAT) içeren numunelerinin PPAT10, PPAT20, PPAT30, PPAT40 ve PPAT50 basınç dayanımları da referans karışıma kıyasla daha düşüktür, ancak 28 günlük dayanımları 139 MPa ile 151 MPa arasında değişmektedir.

Porselen parlatma atığı tozu oranı arttıkça, basınç dayanımı da artmaktadır. Tüm karışımlar için, basınç dayanımı 7 günden 28 güne kadar artmaktadır. Bu, betonun zamanla daha da sertleştiğini ve dayanımının arttığını göstermektedir. Karışım performanslarını karşılaştırıldığında; Referans karışımın, tüm yaşlarda %30 ikame

oranına kadar en yüksek basınç dayanımına sahip olduğu anlaşılmaktadır. Pomza tozu içeren karışımlar, porselen parlatma atığı tozu içeren karışımlara kıyasla daha yüksek basınç dayanımına sahiptir. Pomza tozu oranı arttıkça, basınç dayanımı da artmaktadır. Referans karışım en yüksek dayanıma sahipken, %30'a kadar pomza ve porselen parlatma atığı tozu içeren karışımlardan daha iyi performans sergilemektedir. Her iki puzolanik malzemenin en yüksek oranda (%50) ikame edilmesiyle 28. kür gününde UYPB beton hedeflerine ulaşıldığı ve referans beton ile kıyaslanabilecek dayanımların eld edildiği görülmektedir. Bu da her iki malzemeyi UYPB betonlar için hem yerli hem de ekonomik birer kaynak haline getirmektedir.



#### 4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Yapılan deneylerde, titrasyon işlemi kullanılarak elde edilen CaO ve OH-konsantrasyonu, kireç aktivitesi eğrisiyle ilişkilendirilerek analiz edilmiştir. Pomza tozu ve porselen parlatma atığı tozu için elde edilen sonuçlar, puzolanik aktivite gösteren kireç aktivitesi eğrisinin altında yer almıştır ve standart sınırlar içinde hesaplanmıştır. PT ve PPAT, taze beton numunelerinin yoğunluk ve yayılma özelliklerini belirgin şekilde etkilemiştir. Puzolan tozu (PT) ve porselen parlatma atığı tozu (PPAT) içeriği arttıkça, taze beton numunelerinin yoğunluk değerlerinde yükselme gözlenmiştir. Özellikle %10 oranında PT ve PPAT içeren numunelerin yoğunluğunda belirgin bir düşüş olmuştur. Ayrıca, PT ve PPAT puzolanik malzemeleri kıyaslandığında, aynı oranda ikame edilen PPAT içeren taze beton numunelerinin yoğunluk değerlerindeki artışın %30 ikame oranına kadar daha azdır. PPAT'nin yoğunluk üzerindeki etkisinin PT'ye göre daha sınırlı olduğunu göstermektedir. Yayılma çapı açısından ise, PT içeren taze beton numunelerinin, aynı oranda PPAT içeren numunelere göre daha az yayılma sergilediği gözlenmiştir. Özellikle %50 oranında ikame edilen PT içeren numunelerin, aynı oranda PPAT içeren numunelere göre %8.69 daha az yayılma gösterdiği tespit edilmiştir. PPAT ve PT'nin UYPB katkısındaki ikame oranı arttıkça basınç dayanımı olumlu yönde etkilenmektedir. PPAT ve PT'nin %40 ve %50 ikamesinde, referans UYPB'ye kıyasla 7., 14. ve 28. günlerde daha yüksek basınç dayanımı elde edilmiştir. Basınç dayanımında olduğu gibi, eğilme dayanımında da PT40, PT50 ve PPAT40 karışımları, referans UYPB'ye kıyasla 7., 14. ve 28. günlerde yüksek sonuçlar vermiştir. Ancak, %50 oranında PPAT katkısı, 7., 14. ve 28. günlerde eğilme dayanımı değerlerinde azalma göstermektedir. Bu durum, farklı puzolanik atık malzemeler olan PT ve PPAT'nin, UYPB üretiminde SD'nin yerini kısmen almak için uygun alternatifler olarak etkin bir şekilde kullanılabileceğini ve UYPB karışımlarında etkili bağlayıcılar olarak hizmet edebileceğini göstermektedir. PT40, PT50 ve PPAT40 karışımları, 28 günlük basınç dayanımı 150 MPa'nın üzerinde ve eğilme dayanımı 20 MPa civarında olmak üzere mükemmel mekanik özelliklere sahiptir ve UYPB içeren SD betona kıyasla daha yüksek sonuçlar elde edilmiştir. Bu oranlarla, UYPB üretiminde hem

kullanılabilirlik hem de düşük maliyet sağlanabilecektir. Eşik kayma gerilmesi ve plastik viskozitenin taze betonun reolojik özellikleri üzerindeki etkilerini inceledik. Pomza tozu (PT) ve porselen parlatma tozu atığı (PPAT) ikamesi, tiksotropik davranış üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu gösterdi. PT ikamesinin artmasıyla tiksotropi değerlerinin arttığı ancak %50 ikame oranında azalma eğilimi gösterdiği gözlemlendi. Benzer şekilde, PPAT ikamesi de tiksotropiyi artırdı ve %50 ikame oranında en yüksek değere ulaşıldı. Bu katkı maddeleri taze betonun reolojik özelliklerini iyileştirebilir ancak ikame oranları dikkatle optimize edilmelidir.

Sonuç olarak, puzolanik aktivite, yapı malzemelerinin mekanik özelliklerini iyileştiren önemli bir süreçtir. Çalışmamızda, pomza tozu (PT) ve porselen parlatma atığı tozunun (PPAT) puzolanik aktivite gösterdiği ve bu malzemelerin beton karışımlarında etkili bağlayıcılar olarak kullanılabileceği tespit edilmiştir. PT ve PPAT'nin UYPB katkısındaki ikame oranı arttıkça, taze beton numunelerinin yoğunluk ve yayılma özellikleri etkilenmiş, genellikle yoğunluk azalırken yayılma çapı da azalmıştır. PPAT ve PT'nin %40 ve %50 oranlarında ikamesi, referans UYPB'ye kıyasla 7., 14. ve 28. günlerde daha yüksek basınç dayanımı sağlamış, ancak %50 PPAT katkısında eğilme dayanımında azalma gözlemlenmiştir. Bu bulgular, PT ve PPAT'nun UYPB üretiminde SD'nin yerini kısmen alarak, hem yüksek mekanik özellikler sağlayabileceğini hem de maliyet etkinliği yaratabileceğini göstermektedir. PT40, PT50 ve PPAT40 karışımları, 28 günlük basınç dayanımı 150 MPa'nın üzerinde ve eğilme dayanımı 20 MPa civarında olmak üzere mükemmel mekanik özelliklere sahip olup, UYPB içeren SD betona kıyasla daha üstün performans sergilemiştir. Bu oranlarla, UYPB üretiminde hem kullanılabilirlik artacak hem de düşük maliyet avantajı sağlanacaktır.

Bundan sonra yapılacak çalışmalarda, ince öğütülmüş pomza tozu ile porselen parlatma atığı tozlarının ultra yüksek performanslı betonların durbilite özellikleri ile boşluk yapılarının incelenmesinin uygun olacağı önerilmektedir. Ayrıca bu iki toz malzemenin yüksek performanslı betonlarda puzolanik malzeme olarak değerlendirilmesi yönünde çalışmaların yapılmasında fayda olacağı düşünülmektedir. Hem pomza tozu hem de porselen parlatma atığı tozlarının ultra yüksek performanslı betonların dayanım gelişimlerine erken yaş (0-28 gün) ile ileri yaş (56-365 gün vb.) etkisinin araştırılması bu malzemelerin kullanımı teşvik edilmesi açısından önemli olacaktır.

## KAYNAKLAR

- Abdellatif, M., Elrahman, M. A., Abadel, A. A., Wasim, M., & Tahwia, A. (2023). Ultra-high performance concrete versus ultra-high performance geopolymer concrete: Mechanical performance, microstructure, and ecological assessment. *Journal of Building Engineering*, 79. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2023.107835>
- Abellán, J., Fernández, J., Torres, N., & Núñez, A. (2020). Statistical optimization of ultra-high-performance glass concrete. *ACI Mater. J.*, 117(1), 243-254. <https://doi.org/10.14359/51720292>
- Acikgenc Ulas, M., Culcu, M. B., & Ulucan, M. (2024). Valorization of recycled aggregates to eco-efficient lightweight self-compacting mortars: Studies on microstructure, mechanical, durability, environmental, and economic properties. *Construction and Building Materials*, 419, 135436. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2024.135436>
- Ahmad, S., Bahraq, A. A., Al-Fakih, A., Maslehuddin, M., & Al-Osta, M. A. (2024). Durability and Mechanical Aspects of UHPC Incorporating Fly Ash and Natural Pozzolan. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 49(4), 5255-5266
- Ahmad, S., Mohaisen, K. O., Adekunle, S. K., Al-Dulaijan, S. U., & Maslehuddin, M. (2019). Influence of admixing natural pozzolan as partial replacement of cement and microsilica in UHPC mixtures. *Construction and Building Materials*, 198, 437-444. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2018.11.260>
- Ahmadi, S. F., Reisi, M., & Sajadi, S. M. (2023). Comparing properties of foamed concrete and lightweight expanded clay aggregate concrete at the same densities. *Case Studies in Construction Materials*, 19, e02539. <https://doi.org/10.1016/J.CSCM.2023.E02539>
- Akhnoukh, A. K., & Buckhalter, C. (2021). Ultra-high-performance concrete: Constituents, mechanical properties, applications and current challenges. *Case Studies in Construction Materials*, 15, e00559. <https://doi.org/10.1016/J.CSCM.2021.E00559>
- Ali, M., Kumar, A., Yvaz, A., & Salah, B. (2023). Central composite design application in the optimization of the effect of pumice stone on lightweight concrete properties using RSM. *Case Studies in Construction Materials*, 18, e01958. <https://doi.org/10.1016/J.CSCM.2023.E01958>
- Almeshal, I., Tayeh, B. A., Alyousef, R., Alabduljabbar, H., Mustafa Mohamed, A., & Alaskar, A. (2020). Use of recycled plastic as fine aggregate in cementitious composites: A review. *Construction and Building Materials*, 253. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2020.119146>

- Alqarni, A. S. (2022a). A comprehensive review on properties of sustainable concrete using volcanic pumice powder ash as a supplementary cementitious material. *Construction and Building Materials*, 323, 126533. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2022.126533>
- Alqarni, A. S. (2022b). A comprehensive review on properties of sustainable concrete using volcanic pumice powder ash as a supplementary cementitious material. *Construction and Building Materials*, 323, 126533. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2022.126533>
- Alsomiri, M., Jiang, X., & Liu, Z. (2021). Elastic restraint effect of concrete circular columns with ultrahigh-performance concrete jackets: An analytical and experimental study. *Materials*, 14(12). <https://doi.org/10.3390/MA14123278>
- Amin, M., Tayeh, B. A., & Agwa, I. S. (2020). Effect of using mineral admixtures and ceramic wastes as coarse aggregates on properties of ultrahigh-performance concrete. *Journal of Cleaner Production*, 273, 123073. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2020.123073>
- Amran, M., Huang, S. S., Onaizi, A. M., Makul, N., Abdelgader, H. S., & Ozbakkaloglu, T. (2022). Recent trends in ultra-high performance concrete (UHPC): Current status, challenges, and future prospects. *Construction and Building Materials*, 352. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2022.129029>
- Amran, M., Murali, G., Makul, N., Tang, W. C., & Eid Alluqmani, A. (2023). Sustainable development of eco-friendly ultra-high performance concrete (UHPC): Cost, carbon emission, and structural ductility. *Construction and Building Materials*, 398, 132477. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2023.132477>
- Asghari, Y., & Mohammadyan-Yasouj, S. E. (2024). Utilization of Porcelain Polishing Residues and Metakaolin in Self-Consolidating Concrete. *Construction and Building Materials*, 420, 135588. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2024.135588>
- Askarian, M., Fakhretaha Aval, S., & Joshaghani, A. (2019). A comprehensive experimental study on the performance of pumice powder in self-compacting concrete (SCC). *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, 7(6), 340-356. <https://doi.org/10.1080/21650373.2018.1511486>
- Azeem, A., Ahmad, S., & Hanif, A. (2023). Wastewater utilization for concrete production: Prospects, challenges, and opportunities. *Journal of Building Engineering*, 80, 108078. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2023.108078>
- Aziz, O. Q., & Ahmed, G. H. (2012). Mechanical properties of Ultra High Performance Concrete (UHPC). *American Concrete Institute, ACI Special Publication*, 289 SP, 331-346. <https://doi.org/10.14359/51684273>
- Azmee, N. M., & Shafiq, N. (2018). Ultra-high performance concrete: From fundamental to applications. *Case Studies in Construction Materials*, 9, e00197. <https://doi.org/10.1016/J.CSCM.2018.E00197>
- Bakis, A. (2019). The Usability of Pumice Powder as a Binding Additive in the Aspect of Selected Mechanical Parameters for Concrete Road Pavement. *Materials* 2019, Vol. 12, Page 2743, 12(17), 2743. <https://doi.org/10.3390/MA12172743>

- Benli, A., Karataş, M., & Sastim, M. V. (2017). Influence of ground pumice powder on the bond behavior of reinforcement and mechanical properties of self-compacting mortars. *Computers and Concrete*, 20(3), 283-290. <https://doi.org/10.12989/CAC.2017.20.3.283>
- Binici, H. (2007). Effect of crushed ceramic and basaltic pumice as fine aggregates on concrete mortars properties. *Construction and Building Materials*, 21(6), 1191-1197. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2006.06.002>
- Boyaiah, V., & Rao, V. S. (2017). *A Review on Usage of Non-Biodegradable Material in Construction Application*. <https://doi.org/10.15680/IJIRSET.2017.0609120>
- BS EN 196-5:2011 - *Methods of testing cement. Pozzolanicity test for pozzolanic cement*. (t.y.). Geliş tarihi 07 Mayıs 2024, gönderen <https://landingpage.bsigroup.com/LandingPage/Standard?UPI=000000000030227409>
- BS EN 12390-7 - *Testing hardened concrete. Density of hardened concrete*. (t.y.). Geliş tarihi 05 Mayıs 2024, gönderen <https://landingpage.bsigroup.com/LandingPage/Undated?UPI=000000000030125424>
- Chen, M., Yang, L., Zheng, Y., Huang, Y., Li, L., Zhao, P., Wang, S., Lu, L., & Cheng, X. (2020). Yield stress and thixotropy control of 3D-printed calcium sulfoaluminate cement composites with metakaolin related to structural build-up. *Construction and Building Materials*, 252, 119090. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2020.119090>
- Çeçen, F., Aktaş, B., & Özbayrak, A. (2023). Decarbonization of the concrete railway sleeper production: bringing the low-dosage pozzolanic cement usage in the sleeper production via novel laminated CFRPU reinforcement technique. *Materials Today Sustainability*, 23, 100455. <https://doi.org/10.1016/J.MTSUST.2023.100455>
- de Matos, P. R., Jiao, D., Roberti, F., Pelisser, F., & Gleize, P. J. P. (2020). Rheological and hydration behaviour of cement pastes containing porcelain polishing residue and different water-reducing admixtures. *Construction and Building Materials*, 262, 120850. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2020.120850>
- Dellano-Paz, F., Calvo-Silvosa, A., Iglesias Antelo, S., & Soares, I. (2015). The European low-carbon mix for 2030: The role of renewable energy sources in an environmentally and socially efficient approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 48, 49-61. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2015.03.032>
- Di Foggia, G., & Beccarello, M. (2024). European roadmaps to achieving 2030 renewable energy targets. *Utilities Policy*, 88. <https://doi.org/10.1016/j.jup.2024.101729>
- Elyasigorji, F., Farajiani, F., Hajipour Manjili, M., Lin, Q., Elyasigorji, S., Farhangi, V., & Tabatabai, H. (2023). Comprehensive Review of Direct and Indirect Pozzolanic Reactivity Testing Methods. *Buildings* 2023, Vol. 13, Page 2789, 13(11), 2789. <https://doi.org/10.3390/BUILDINGS13112789>

- Gonzales, G. J. ;, Toledo, W. K. ;, Garcia, J. M. ;, Newton, C. M. ;, Allena, S. A., Mousavinezhad, S., Gonzales, G. J., Toledo, W. K., Garcia, J. M., Newton, C. M., & Allena, S. (2023a). A Comprehensive Study on Non-Proprietary Ultra-High-Performance Concrete Containing Supplementary Cementitious Materials. *Materials* 2023, Vol. 16, Page 2622, 16(7), 2622. <https://doi.org/10.3390/MA16072622>
- Gonzales, G. J. ;, Toledo, W. K. ;, Garcia, J. M. ;, Newton, C. M. ;, Allena, S. A., Mousavinezhad, S., Gonzales, G. J., Toledo, W. K., Garcia, J. M., Newton, C. M., & Allena, S. (2023b). A Comprehensive Study on Non-Proprietary Ultra-High-Performance Concrete Containing Supplementary Cementitious Materials. *Materials* 2023, Vol. 16, Page 2622, 16(7), 2622. <https://doi.org/10.3390/MA16072622>
- Griffiths, S., Sovacool, B. K., Furszyfer Del Rio, D. D., Foley, A. M., Bazilian, M. D., Kim, J., & Uratani, J. M. (2023). Decarbonizing the cement and concrete industry: A systematic review of socio-technical systems, technological innovations, and policy options. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 180, 113291. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2023.113291>
- Guo, D., Guo, M., Zhou, Y., & Zhu, Z. (2024). Use of nano-silica to improve the performance of LC3-UHPC: Mechanical behavior and microstructural characteristics. *Construction and Building Materials*, 411, 134280. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2023.134280>
- Hamada, H. M., Abdulhaleem, K. N., Majdi, A., Al Jawahery, M. S., Skariah Thomas, B., & Yousif, S. T. (2023). The durability of concrete produced from pozzolan materials as a partially cement replacement: A comprehensive review. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2023.03.337>
- Hamada, H. M., Abed, F., Beddu, S., Humada, A. M., & Majdi, A. (2023). Effect of Volcanic Ash and Natural Pozzolana on mechanical properties of sustainable cement concrete: A comprehensive review. *Case Studies in Construction Materials*, 19, e02425. <https://doi.org/10.1016/J.CSCM.2023.E02425>
- Hu, C., & De Larrard, F. (1996). The rheology of fresh high-performance concrete. *Cement and Concrete Research*, 26(2), 283-294. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(95\)00213-8](https://doi.org/10.1016/0008-8846(95)00213-8)
- Ige, O. A. (2023). Sources of recycled aggregates for concrete production. *Multi-functional Concrete with Recycled Aggregates*, 3-16. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-89838-6.00002-5>
- Ishak, S. A., & Hashim, H. (2022). Effect of mitigation technologies on the total cost and carbon dioxide emissions of a cement plant under multi-objective mixed linear programming optimisation. *Chemical Engineering Research and Design*, 186, 326-349. <https://doi.org/10.1016/J.CHERD.2022.07.048>
- Islam, M. S., Begum, S., Malcolm, M. L., Hashmi, M. S. J., & Islam, M. S. (2020). The Role of Engineering in Mitigating Global Climate Change Effects: Review of the Aspects of Carbon Emissions from Fossil Fuel-Based Power Plants and Manufacturing Industries. *Encyclopedia of Renewable and Sustainable Materials: Volume 1-5*, 1-5, 750-762. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.11274-3>

- Jiang, J., Ye, Z., Wu, J., Yang, Q., Li, Q., & Kong, X. (2024a). Impact of triethanolamine on the hydration of Portland cement in the presence of high pozzolanic activity supplementary cementitious materials. *Cement and Concrete Composites*, 147, 105435. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONCOMP.2024.105435>
- Jiang, J., Ye, Z., Wu, J., Yang, Q., Li, Q., & Kong, X. (2024b). Impact of triethanolamine on the hydration of Portland cement in the presence of high pozzolanic activity supplementary cementitious materials. *Cement and Concrete Composites*, 147, 105435. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONCOMP.2024.105435>
- Jubera-Pérez, F. J., Jaizme-Vega, E., Rosa-Orihuela, R., Damas-Montesdeoca, R., Hernández-Díaz, C., Rodríguez-Díaz, J., & González-Díaz, E. (2024). Pozzolanic activity of volcanic ashes produced by the eruption of the Tajogaite Volcano in La Palma, Canary Islands. *Construction and Building Materials*, 419, 135498. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2024.135498>
- Kalisz, S., Kibort, K., Mioduska, J., Lieder, M., & Małachowska, A. (2022). Waste management in the mining industry of metals ores, coal, oil and natural gas - A review. *Journal of Environmental Management*, 304, 114239. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2021.114239>
- Karthikeyan, S., Arun, P., & Thiyaneswaran, M. P. (2020). Summary of non-biodegradable wastes in concrete. *AIP Conference Proceedings*, 2235(1). <https://doi.org/10.1063/5.0007586/762767>
- Keke, L., Yong, L., Liuliu, X., Junjie, Z., Kangning, L., Dingqiang, F., & Rui, Y. (2022). Rheological characteristics of Ultra-High performance concrete (UHPC) incorporating bentonite. *Construction and Building Materials*, 349, 128793. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2022.128793>
- Khayat, K. H., Meng, W., Vallurupalli, K., & Teng, L. (2019). Rheological properties of ultra-high-performance concrete — An overview. *Cement and Concrete Research*, 124, 105828. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONRES.2019.105828>
- Kirsever, D., & Özkan Toplan, H. (t.y.). *Perlit Katkılı Porselen Parlatma Atıklarından Gözenekli Seramik Malzeme Üretimi*. <http://orcid.org/0000-0002-3928-2733>
- Koňáková, D., Pommer, V., Jerman, M., Keppert, M., Černý, R., & Vejmelková, E. (2022). Utilization of ceramic powder, calcined shale and sintered mullite as partial replacements of calcium aluminate cement. *Construction and Building Materials*, 326, 126824. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2022.126824>
- Kravanja, G., Mumtaz, A. R., & Kravanja, S. (2024). A Comprehensive Review of the Advances, Manufacturing, Properties, Innovations, Environmental Impact and Applications of Ultra-High-Performance Concrete (UHPC). *Buildings* 2024, Vol. 14, Page 382, 14(2), 382. <https://doi.org/10.3390/BUILDINGS14020382>
- Lamba, P., Kaur, D. P., Raj, S., & Sorout, J. (2022). Recycling/reuse of plastic waste as construction material for sustainable development: a review. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(57), 86156-86179. <https://doi.org/10.1007/S11356-021-16980-Y/FIGURES/4>

- Li, H., Zhao, G., & Zhang, H. (2023). Recent Progress of Cement-Based Materials Modified by Graphene and Its Derivatives. *Materials*, 16(10). <https://doi.org/10.3390/MA16103783>
- Li, L. G., Zhuo, Z. Y., Zhu, J., Chen, J. J., & Kwan, A. K. H. (2019). Reutilizing ceramic polishing waste as powder filler in mortar to reduce cement content by 33% and increase strength by 85%. *Powder Technology*, 355, 119-126. <https://doi.org/10.1016/J.POWTEC.2019.07.043>
- Li, L., Joseph, P., Zhang, X., & Zhang, L. (2024). A study of some relevant properties of concrete incorporating waste ceramic powder as a cement replacement agent. *Journal of Building Engineering*, 87, 109106. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2024.109106>
- Li, M., & Li, V. C. (2013). Rheology, fiber dispersion, and robust properties of engineered cementitious composites. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 46(3), 405-420. <https://doi.org/10.1617/S11527-012-9909-Z>
- Li, X., Tian, B., Lv, Y., Zhang, C., Jiang, D., Xu, J., He, C., Jian, S., Wu, K., & Deng, X. (2023a). Ultra-high performance concrete prepared with ceramic polishing waste: Hydration, microstructure and mechanical property. *Powder Technology*, 424, 118567. <https://doi.org/10.1016/J.POWTEC.2023.118567>
- Li, X., Tian, B., Lv, Y., Zhang, C., Jiang, D., Xu, J., He, C., Jian, S., Wu, K., & Deng, X. (2023b). Ultra-high performance concrete prepared with ceramic polishing waste: Hydration, microstructure and mechanical property. *Powder Technology*, 424, 118567. <https://doi.org/10.1016/J.POWTEC.2023.118567>
- Li, X., Tian, B., Lv, Y., Zhang, C., Jiang, D., Xu, J., He, C., Jian, S., Wu, K., & Deng, X. (2023c). Ultra-high performance concrete prepared with ceramic polishing waste: Hydration, microstructure and mechanical property. *Powder Technology*, 424, 118567. <https://doi.org/10.1016/J.POWTEC.2023.118567>
- Li, Y., Zhao, S. mu, Yao, Z. ao, & Huang, X. (2023). Flexural behavior of reinforced concrete beams strengthened using recycled industrial steel-wire mesh high-performance mortar. *Case Studies in Construction Materials*, 19, e02472. <https://doi.org/10.1016/J.CSCM.2023.E02472>
- Liu, J., Wei, J., Li, J., Su, Y., & Wu, C. (2024). A comprehensive review of ultra-high performance concrete (UHPC) behaviour under blast loads. *Cement and Concrete Composites*, 148, 105449. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONCOMP.2024.105449>
- Lu, J. X. (2023). Recent advances in high strength lightweight concrete: From development strategies to practical applications. *Construction and Building Materials*, 400, 132905. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2023.132905>
- Maaze, M. R., & Shrivastava, S. (2023). Development of framework in the selection and reuse of concrete waste and brick waste powder as pozzolanic material in cement concrete application using analytical hierarchy process technique. *Construction and Building Materials*, 393, 132056. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2023.132056>

- Mahajan, D. S., & Muhammad, S. (2024). Assessment of the viability of pozzolanic activity of copper slag for use as supplementary cementitious material in ordinary Portland cement. *Journal of Building Engineering*, 83, 108375. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2023.108375>
- Marvila, M. T., De Azevedo, A. R. G., De Matos, P. R., Monteiro, S. N., & Vieira, C. M. F. (2021). Materials for Production of High and Ultra-High Performance Concrete: Review and Perspective of Possible Novel Materials. *Materials*, 14(15). <https://doi.org/10.3390/MA14154304>
- Medeiros, A. G., Gurgel, M. T., da Silva, W. G., de Oliveira, M. P., Ferreira, R. L. S., & de Lima, F. J. N. (2021). Evaluation of the mechanical and durability properties of eco-efficient concretes produced with porcelain polishing and scheelite wastes. *Construction and Building Materials*, 296, 123719. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2021.123719>
- Ndahirwa, D., Zmamou, H., Lenormand, H., & Leblanc, N. (2022). The role of supplementary cementitious materials in hydration, durability and shrinkage of cement-based materials, their environmental and economic benefits: A review. *Cleaner Materials*, 5, 100123. <https://doi.org/10.1016/J.CLEMA.2022.100123>
- Ntuli, M. N., Dioha, M. O., Ewim, D. R. E., & Eloka-Eboka, A. C. (2022). Review of energy modelling, energy efficiency models improvement and carbon dioxide emissions mitigation options for the cement industry in South Africa. *Materials Today: Proceedings*, 65, 2260-2268. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2022.07.093>
- Nuripuah, J. G., Duwiejuah, A. B., & Bakobie, N. (2022). Awareness and health risk protection behaviours of scavengers in the Gbalahi landfill site, Ghana, in the era of sustainable development. *Discover Sustainability*, 3(1). <https://doi.org/10.1007/S43621-021-00070-7>
- Ozkan, M., Narappa, A. B., Namboodiri, T., Chai, Y., Babu, M., Jennings, J. S. E., Gao, Y., Tasneem, S., Lam, J., Talluri, K. R., Shang, R., Ozkan, C. S., & Watkins, J. M. (2024). Forging a sustainable sky: Unveiling the pillars of aviation e-fuel production for carbon emission circularity. *iScience*, 27(3), 109154. <https://doi.org/10.1016/J.ISCI.2024.109154>
- Pang, L., Pan, Y., Deng, B., Zhang, D., & Wang, Q. (2023). Conjoint reuse of ceramic polishing waste and calcium carbide slag as mineral admixtures: Hydration and mechanical properties. *Journal of Building Engineering*, 72, 106741. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2023.106741>
- Paris, J. M., Roessler, J. G., Ferraro, C. C., Deford, H. D., & Townsend, T. G. (2016). A review of waste products utilized as supplements to Portland cement in concrete. *Journal of Cleaner Production*, 121, 1-18. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2016.02.013>
- Patrick, N. L., Madirisha, M. M., & Mtei, R. P. (2024). Potential of Tanzanian natural pozzolans as geopolymer cement for oil and gas wellbore integrity. *Construction and Building Materials*, 418, 135342. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2024.135342>

- Praveenkumar, T. R., Sekar, M., Pasupuleti, R. R., Gavurová, B., Arun Kumar, G., & Vignesh Kumar, M. (2024). Current technologies for plastic waste treatment for energy recovery, it's effects on poly aromatic hydrocarbons emission and recycling strategies. *Fuel*, 357, 129379. <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2023.129379>
- Qian, Y., & Kawashima, S. (2018). Distinguishing dynamic and static yield stress of fresh cement mortars through thixotropy. *Cement and Concrete Composites*, 86, 288-296. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONCOMP.2017.11.019>
- Rahhal, V. F., Trezza, M. A., Tironi, A., Castellano, C. C., Pavlíková, M., Pokorný, J., Irassar, E. F., Jankovský, O., & Pavlík, Z. (2019). Complex Characterization and Behavior of Waste Fired Brick Powder-Portland Cement System. *Materials*, 12(10). <https://doi.org/10.3390/MA12101650>
- Raj R, S., Arulraj, G. P., Anand, N., Kanagaraj, B., & Lubloy, E. (2024). Influence of Nano-Fly Ash on mechanical properties, microstructure characteristics and sustainability analysis of Alkali Activated Concrete. *Developments in the Built Environment*, 17. <https://doi.org/10.1016/J.DIBE.2024.100352>
- Ramazanoğlu, D. (2023a). Composite Materials in Biomimetic Nanohybrid Structures for Analytical Chemistry, Surface Chemistry, and Corrosion. İçinde *Farklı Mühendislik Yaklaşımlarıyla Kompozit Malzemeler- I. Özgür Yayınları*. <https://doi.org/10.58830/ozgur.pub131.c512>
- Ramazanoğlu, D. (2023b). Nanotechnology and Architecture: Applications and Potential of Nanocomposites. İçinde *Farklı Mühendislik Yaklaşımlarıyla Kompozit Malzemeler-II. Özgür Yayınları*. <https://doi.org/10.58830/ozgur.pub172.c892>
- Ramos, G. A., de Matos, P. R., Pelisser, F., & Gleize, P. J. P. (2020). Effect of porcelain tile polishing residue on eco-efficient geopolymer: Rheological performance of pastes and mortars. *Journal of Building Engineering*, 32, 101699. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2020.101699>
- Ren, Y., Yang, S., Andersen, K. H., Yang, Q., & Wang, Y. (2021). Thixotropy of soft clay: A review. *Engineering Geology*, 287, 106097. <https://doi.org/10.1016/J.ENGGE.2021.106097>
- Rodríguez-Benavides, D., Andrés-Rosales, R., Álvarez-García, J., & Bekun, F. V. (2024). Convergence of clubs between per capita carbon dioxide emissions from fossil fuels and cement production. *Energy Policy*, 186, 114007. <https://doi.org/10.1016/J.ENPOL.2024.114007>
- RSX SST Rheometer - Simultaneous Shear and Elongational Flow Testing*. (t.y.). Geliş tarihi 04 Haziran 2024, gönderen <https://www.brookfieldengineering.com/products/rheometers/rsx-sst-rheometer>
- Sarıdemir, M., & Bulut, M. (2021). Effects of ground basaltic pumice and high temperatures on the properties of HSMs. *Journal of Building Engineering*, 41, 102772. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2021.102772>

- Seis, M., Subaşı, S., Maraşlı, M., & Dehghanpour, H. (2023). Investigation of mechanical and electrical properties of ultra-low rate SWCNT added UHPC. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 38(1), 509-519. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.929690>
- Šídlová, M., Šulc, R., Škvára, F., Pulcová, K., Formáček, P., & Snop, R. (2023). Pozzolanic activity of stockpile ash: Comparison of test methods. *Case Studies in Construction Materials*, 19, e02396. <https://doi.org/10.1016/J.CSCM.2023.E02396>
- Singh, V. K. (2023). Pollutants and pollution control in the cement industry. *The Science and Technology of Cement and Other Hydraulic Binders*, 387-422. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-95080-0.00011-X>
- Tai, Y. S., & El-Tawil, S. (2017). High loading-rate pullout behavior of inclined deformed steel fibers embedded in ultra-high performance concrete. *Construction and Building Materials*, 148, 204-218. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2017.05.018>
- Tanyildizi, M. (2022). Pozzolanic activity of pumice under different curing temperatures and durations. *BITLIS EREN UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE AND TECHNOLOGY*, 12(2), 64-70. [www.dergipark.gov.tr/beuscitech](http://www.dergipark.gov.tr/beuscitech)
- Tayeh, B. A., Hamada, H. M., Almeshal, I., & Bakar, B. H. A. (2022a). Durability and mechanical properties of cement concrete comprising pozzolanic materials with alkali-activated binder: A comprehensive review. *Case Studies in Construction Materials*, 17, e01429. <https://doi.org/10.1016/J.CSCM.2022.E01429>
- Tayeh, B. A., Hamada, H. M., Almeshal, I., & Bakar, B. H. A. (2022b). Durability and mechanical properties of cement concrete comprising pozzolanic materials with alkali-activated binder: A comprehensive review. *Case Studies in Construction Materials*, 17, e01429. <https://doi.org/10.1016/J.CSCM.2022.E01429>
- TSE - TS EN 12350-6 - Testing fresh concrete - Part 6: Density | GlobalSpec. (t.y.). Geliş tarihi 05 Mayıs 2024, gönderen <https://standards.globalspec.com/std/10238762/ts-en-12350-6>
- TSE - TS EN 12390-3/AC - Testing hardened concrete - Part 3 : Compressive strength of test specimens | GlobalSpec. (t.y.). Geliş tarihi 05 Mayıs 2024, gönderen <https://standards.globalspec.com/std/10248958/ts-en-12390-3-ac>
- Ullah, R., Qiang, Y., Ahmad, J., Vatin, N. I., & El-Shorbagy, M. A. (2022). Ultra-High-Performance Concrete (UHPC): A State-of-the-Art Review. *Materials* 2022, Vol. 15, Page 4131, 15(12), 4131. <https://doi.org/10.3390/MA15124131>
- van Vuuren, D. P., Kok, M. T. J., Girod, B., Lucas, P. L., & de Vries, B. (2012). Scenarios in Global Environmental Assessments: Key characteristics and lessons for future use. *Global Environmental Change*, 22(4), 884-895. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2012.06.001>

- Wang, S., Van Tuan Nguyen, Xiu, Z., & Han, W. (2023). Test research on the effect of waste ceramic polishing powder on the compressive strength and chloride penetration resistance of seawater concrete. *Construction and Building Materials*, 386, 131590. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2023.131590>
- Wu, C., Li, J., & Su, Y. (2018). Ultra-high performance concrete columns. *Development of Ultra-High Performance Concrete Against Blasts*, 215-282. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102495-9.00004-9>
- Wu, Y. C., Wang, X., & Li, M. (2024). Role of thixotropy in interlayer microstructure and properties of additively manufactured cementitious materials. *Cement and Concrete Research*, 179, 107460. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONRES.2024.107460>
- Xiong, Y., Xu, G., Wu, D., Fang, S., & Tang, Y. (2021). Investigation of using the ceramic polishing brick powder in engineered cementitious composites. *Journal of Building Engineering*, 43, 102489. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2021.102489>
- Xu, K., Huang, W., Zhang, L., Fu, S., Chen, M., Ding, S., & Han, B. (2021). Mechanical properties of low-carbon ultrahigh-performance concrete with ceramic tile waste powder. *Construction and Building Materials*, 287, 123036. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2021.123036>
- Yang, E. H., Sahmaran, M., Yang, Y., & Li, V. C. (2009). Rheological Control in Production of Engineered Cementitious Composites. *Materials Journal*, 106(4), 357-366. <https://doi.org/10.14359/56656>
- Yang, J., Kang, H., Shi, C., Hu, X., & Moon, J. (2024). Tomographic analysis of segregation behavior of hollow glass microspheres in lightweight cementitious composites. *Cement and Concrete Composites*, 149, 105516. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONCOMP.2024.105516>
- Yang, J., Ren, Y., Chen, S., Zhang, Z., Pang, H., Wang, X., & Lu, J. (2023). Thermally activated drinking water treatment sludge as a supplementary cementitious material: Properties, pozzolanic activity and hydration characteristics. *Construction and Building Materials*, 365, 130027. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2022.130027>
- Yang, J., Wang, Y., Zhang, Z., Zou, Y., & Zhou, J. (2023). Early-age shrinkage characteristic of UHPC in strengthening stone masonry arch: Influence of restraint from arch structure. *Structures*, 58, 105465. <https://doi.org/10.1016/J.ISTRUC.2023.105465>
- Yu, R., Zhou, F., Yin, T., Wang, Z., Ding, M., Liu, Z., Leng, Y., Gao, X., & Shui, Z. (2021). Uncovering the approach to develop ultra-high performance concrete (UHPC) with dense meso-structure based on rheological point of view: Experiments and modeling. *Construction and Building Materials*, 271, 121500. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2020.121500>
- Zarasvand, K. A., Narani, S. S., & Siddiqua, S. (2023). Thermal insulation enhancement of rammed earth using wood fly ash and calcium bentonite. *Construction and Building Materials*, 409. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2023.134097>

Zhao, Z., Chen, M., Xu, J., Li, L., Huang, Y., Yang, L., Zhao, P., & Lu, L. (2021). Mix design and rheological properties of magnesium potassium phosphate cement composites based on the 3D printing extrusion system. *Construction and Building Materials*, 284, 122797. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2021.122797>





## ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Mukhtar OSMANOV

### ÖĞRENİM DURUMU:

- Lisans** : 2021, Azerbaycan Mimarlık ve İnşaat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği
- Yükseklisans** : Devam Ediyor, Sakarya Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği, İnşaat Mühendisliği

### MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2023-2024 TÜBİTAK-1505 3d Yazıcı Teknolojisi ile Amorf Yüzeylerin Elde Edilmesine Yönelik Lif Takviyeli Beton Kompozit Mürekkebi Geliştirilmesi projesinde bursiyerim.

### TEZDEN TÜRETİLEN ESERLER:

- Osmanov M., Matos M., ve Emiroğlu M. (2024, 29-31, Mayıs). Investigation of The Effect of Using Pumice Powder on Fresh Mortar Properties in Ultra High Performance. 12. Uluslararası İstanbul Bilimsel Çalışmalar Kongresi, İstanbul, Türkiye.