

**T.C.  
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



**YÜKSEK FIRIN CÜRUFU VE METAKAOLİNİN YARI RİJİT KAPLAMADA  
KATKI MALZEMESİ OLARAK KULLANILMASI**

**Hasib Faisal HAFİZİ**

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ**

**ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**HAZİRAN 2023**

**ANTALYA**

T.C.  
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ



**YÜKSEK FIRIN CÜRUFU VE METAKAOLİNİN YARI RİJİT KAPLAMADA  
KATKI MALZEMESİ OLARAK KULLANILMASI**

**Hasib Faisal HAFİZİ**

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ**

**ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**HAZİRAN 2023**

**ANTALYA**

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

**YÜKSEK FIRIN CÜRUFU VE METAKAOLİNİN YARI RİJİT KAPLAMADA  
KATKI MALZEMESİ OLARAK KULLANILMASI**

**Hasib Faisal HAFİZİ**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ**

**ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Bu tez T.C. Akdeniz Üniversitesi BAP birimi tarafından FYL-2022-5994 nolu  
proje ile desteklenmiştir.**

**HAZİRAN 2023**

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

**YÜKSEK FIRIN CÜRUFU VE METAKAOLİNİN YARI RİJİT KAPLAMADA  
KATKI MALZEMESİ OLARAK KULLANILMASI**

**Hasib Faisal HAFİZİ**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ**

**ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

Bu tez 21/06/2023 tarihinde jüri tarafından Oybirliği / ~~Oyçokluğu~~ ile kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Sevil KÖFTECİ (Danışman)

Prof. Dr. Hasan Erdem ÇAMURLU

Dr. Öğr. Üyesi Mustafa Sinan YARDIM

## ÖZET

### YÜKSEK FIRIN CÜRUFU VE METAKAOLİNİN YARI RİJİT KAPLAMADA KATKI MALZEMESİ OLARAK KULLANILMASI

**Hasib Faisal HAFİZİ**

**Yüksek Lisans, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Danışman: Doç. Dr. Sevil KÖFTECİ**

**Haziran 2023, 69 sayfa**

Artan trafik yükleri, yol üstyapılarının hızla bozulmasına neden olmaktadır. Yarı Rijit Kaplamalar (YRK); içerdiği çimento harcı sebebiyle özellikle tekerlek izlerine karşı dayanıklı bir üstyapı tipidir. YRK; derzsiz yapısı, yüksek mukavemeti, sızdırmazlığı, yüksek dayanıklılığı ve yakıt direnci avantajları sayesinde endüstriyel zeminler, otobüs terminalleri, yükleme platformları ve diğer alanlar gibi yoğun trafik alanlarının inşasında ve yenilenmesinde uygulanmaktadır. Bu çalışmada akışkan çimento harcına eklenen yüksek fırın cürufu ve metakaolin katkılarıyla, YRK'nin kötü hava koşullarına ve suya karşı dayanımı araştırılmış, yolun işletme maliyetinin azaltılması ve sürüş konforunun iyileştirilmesi hedeflenmiştir. Aynı zamanda çelik üretiminde atık malzeme olarak ortaya çıkan yüksek fırın cürufu gibi atık olan bir puzolanın kullanılması sağlanarak, sürdürülebilir bir yol kaplaması elde edilmesi hedeflenmiştir. Tez çalışması kapsamında ilk olarak hazırlanan katkılı ve katkısız harçlara akışkanlık, terleme, basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve büzülme deneyleri yapılmıştır. Daha sonra en iyi performans özelliklerini gösterdiği tespit edilen harçlar, saha koşullarını temsil eden büyük kalıplardaki poroz asfalt içine dökülüp karot numuneleri alınmıştır. Alınan karot numunelerine kompozit karışımın performansını temsil eden performans deneyleri uygulanmıştır. Deneysel olarak gerçekleştirilen tez çalışması sonucunda, YRK (MK)'nin uzun dönemde Marshall stabilite, basınç ve nem hasarına karşı kaplamanın dayanımını artırdığı tespit edilmiştir. YRK (YFC)'nin ise deneysel çalışmalarda Marshall stabilite değerinin yüksek çıktığı , akma değeri sonuçlarına göre YRK'yi rijitleştirdiği, nem hasarına karşı kaplamanın direncini arttırdığı belirlenmiştir. Ayrıca her iki katkıda darbelenme, donma-çözünme, kayma direnci açısından YRK'ye olumlu yönde etki yapmışlardır.

**ANAHTAR KELİMELEER:** Akışkan Harç, Metakaolin, Sürdürülebilirlik, Yarı Rijit Kaplama, Yüksek Fırın Cürufu.

**JÜRİ:** Doç. Dr. Sevil KÖFTECİ

Prof. Dr. Hasan Erdem ÇAMURLU

Dr. Öğr. Üyesi Mustafa Sinan YARDIM



## **ABSTRACT**

### **IMPROVING THE PERFORMANCE OF FILLING MORTAR USED IN SEMI-RIGID PAVEMENT WITH BLAST FURNACE SLAG AND METAKAOLIN**

**Hasib Faisal HAFİZİ**

**MSc Thesis in Civil Engineering:**

**Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Sevil KÖFTECİ**

**Jun 2023; 69 pages**

The pavement on roads deteriorates as traffic volumes rise. Semi-Rigid Pavements (SRP) are a type of superstructure that are particularly resistant to ruts due to the cement mortar they contain. SRP is highly suggested to be used in the construction and renovation of high traffic areas such as industrial lands, bus terminals, loading platforms, and other areas because of its jointless structure, high strength, tightness, high durability, and fuel resistance advantages. In this study with the addition of blast furnace slag (BFS) and metakaolin (MK) to the fluid cement mortar, the resistance of SRP to inclement weather and water was examined. Thus with the intention of lowering the road's operating costs and enhancing driving comfort. Using waste products like blast furnace slag, which is produced as a byproduct of the steel industry, is one way to achieve a sustainable road pavement. This laboratory based thesis includes testing with and without additive mortars those are fluidity, sweating, compressive strength, bending strength, and shrinkage. The best-performing mortars were then poured into porous asphalt in sizable molds that simulated field conditions, and core samples were obtained. The core samples were subjected to performance tests that represented the performance of the composite mixture. The experimental thesis led to the conclusion that SRP(MK) boosted the coating's long-term endurance against Marshall stability, pressure, and moisture damage. On the other hand, it was found that SRP(BFS) had a high Marshall stability value, which made the SRP rigid according to yield value data and boosted the coating's resistance to moisture damage. Both additions improved SRP in terms of impact, freeze-thaw, and slide resistance as well.

**KEYWORDS:** Semi-Rigid pavement, Blast Furnace Slag, Metakaolin, Fluid Mortar.

**COMMITTEE:** Assoc. Prof. Dr. Sevil KÖFTECİ

Prof. Dr. Hasan Erdem ÇAMURLU

Asst. prof. Mustafa Sinan YARDIM



## ÖNSÖZ

Bu tezin tamamlanmasına en büyük katkıda bulunan ve değerli fikirlerini paylaştan tez danışmanım Doç. Dr. Sevil KÖFTECİ'ye derin bir şekilde teşekkür etmek istiyorum.

Ayrıca teorik ve deneysel çalışmalarımda bana destek olan arkadaşlarım, Azad DİNLER, Elmaddin MAHMUDLU ve Allahverdi GULUYEV'e teşekkür etmek istiyorum. Çok keyifli zamanlar geçirdik.

Beni bu günlere getiren ve benden desteklerini benden esirgemeyen anneme, hayatını kaybeden babama ve amcama sonsuz teşekkürler.

Tez çalışmamı maddi olarak destekleyen Akdeniz Üniversitesi BAP Birimi'ne teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışması boyunca deneysel çalışmalar için ekipman desteğinde bulunan KGM 13. Bölge Müdürlüğü'ne ve agrega temininde sağladığı kolaylıklar için ERKSA Madenciliğe teşekkürü bir borç bilirim.

## İÇİNDEKİLER

|                                                             |      |
|-------------------------------------------------------------|------|
| ÖZET.....                                                   | i    |
| ABSTRACT.....                                               | iii  |
| ÖNSÖZ .....                                                 | v    |
| AKADEMİK BEYAN .....                                        | viii |
| SİMGELER VE KISALTMALAR.....                                | ix   |
| ŞEKİLLER DİZİNİ.....                                        | xi   |
| ÇİZELGELER DİZİNİ .....                                     | xiii |
| 1. GİRİŞ .....                                              | 1    |
| 2. KAYNAK TARAMASI.....                                     | 3    |
| 3. MATERYAL VE METOT.....                                   | 7    |
| 3.1. Materyal.....                                          | 7    |
| 3.1.1. Çimento.....                                         | 7    |
| 3.1.2. Agregası.....                                        | 8    |
| 3.1.3. Süper akışkanlaştırıcı.....                          | 8    |
| 3.1.4. Yüksek fırın cürufu ve metakaolin .....              | 9    |
| 3.2. Metot .....                                            | 13   |
| 3.2.1. Agregası deneyleri.....                              | 13   |
| 3.2.1.1. Elek analizi deneyi.....                           | 13   |
| 3.2.1.2. Los Angeles deneyi (Aşınma kaybı).....             | 14   |
| 3.2.1.4. İri agregası özgül ağırlık ve su emme deneyi.....  | 15   |
| 3.2.1.5. İnce agregası özgül ağırlık ve su emme deneyi..... | 16   |
| 3.2.1.6. Soyulma deneyi.....                                | 18   |
| 3.2.1.7. Metilen mavisi deneyi.....                         | 19   |
| 3.2.2. Bitüm deneyleri .....                                | 20   |
| 3.2.2.1. Penetrasyon deneyi .....                           | 20   |
| 3.2.2.2. Yumuşama noktası deneyi .....                      | 20   |
| 3.2.2.3. Parlama noktası deneyi .....                       | 21   |
| 3.2.3. Çimento harcının hazırlanması .....                  | 23   |
| 3.2.4. Harç deneyleri.....                                  | 25   |
| 3.2.4.1. Akışkanlık deneyi .....                            | 25   |
| 3.2.4.2. Terleme deneyi.....                                | 26   |

|                                                 |    |
|-------------------------------------------------|----|
| 3.2.4.3. Eğilme dayanımı deneyi .....           | 27 |
| 3.2.4.4. Basınç dayanımı deneyi .....           | 28 |
| 3.2.4.5. Büzülme deneyi .....                   | 29 |
| 3.2.5. Yarı rijit kaplamanın hazırlanması ..... | 30 |
| 3.2.6. Yarı rijit kaplama deneyleri .....       | 33 |
| 3.2.6.1. Marshall stabilite ve akma deneyi..... | 33 |
| 3.2.6.2. Nem hasarına karşı direnç deneyi ..... | 34 |
| 3.2.6.3. Basınç dayanımı .....                  | 36 |
| 3.2.6.5. Permeabilite deneyi.....               | 38 |
| 3.2.6.6. Cantabro deneyi (Aşınma testi) .....   | 40 |
| 4. BULGULAR VE TARTIŞMA .....                   | 42 |
| 4.1. Agrega Deneylerinin Sonuçları .....        | 42 |
| 4.2. Bitüm Deneylerinin Sonuçları.....          | 43 |
| 4.3. Akışkan Çimento Harcının Sonuçları.....    | 43 |
| 4.3.1. YFC katkılı çimento harçları .....       | 44 |
| 4.3.2. MK katkılı çimento harçları.....         | 51 |
| 4.4. YRK Deneylerinin Sonuçları .....           | 57 |
| 4.4.1. Marshall stabilite ve akma deneyi .....  | 57 |
| 4.4.2. Nem hasarına karşı direnç deneyi.....    | 59 |
| 4.4.3. Basınç dayanımı deneyi.....              | 60 |
| 4.4.4. Cantabro deneyi .....                    | 61 |
| 4.4.5. Donma-çözülme deneyi .....               | 62 |
| 4.4.6. Permeabilite deneyi .....                | 62 |
| 4.4.7. Yüzey pürüzlülüğü deneyi.....            | 63 |
| 5. SONUÇLAR .....                               | 64 |
| 6. KAYNAKLAR .....                              | 66 |
| ÖZGEÇMİŞ                                        |    |

## AKADEMİK BEYAN

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Yüksek fırın cürufu ve metakaolinin yarı rijit kaplamada katkı malzemesi olarak kullanılması” adlı bu çalışmanın, akademik kurallar ve etik değerlere uygun olarak yazıldığını belirtir, bu tez çalışmasında bana ait olmayan tüm bilgilerin kaynağını gösterdiğimi beyan ederim.

...../...../2023

Hasib Faisal Hafizi

## SİMGELER VE KISALTMALAR

### Simgeler

% : Yüzde

‘ : Kesme işareti

°C : Derece Santigrat

kN : Kilonewton

kPa : Kilopaskal

MPa : Megapaskal

g/cm<sup>3</sup> : Gram/ Santimetreküp

gr : Gram

kg : Kilogram

m : Metre

cm : Santimetre

mm : Milimetre

ml : Mililitre

dk : Dakika

N : Newton

mm<sup>2</sup> : Milimetrekare

m<sup>3</sup> : Metreküp

sn : Saniye

### **Kısaltmalar**

YRK : Yarı rijit kaplama

YFC : Yüksek fırın cürufu

MK : Metakaolin

SDKY : Suyu doygun kuru yüzeyi

MM : Metilen mavi

TFOT : Thin Film Oven Test

BSK : Bitümlü sıcak kaplama

SRP : Semi rigid pavement

BFS : Blast furnace slag

su/çim : Su çimento

BÇ : Beyaz çimento

Seg : Segregasyon

Akış : Akışkanlaştırıcı

BPN : British Pendulum Number

KN : Kontrol numunesi

\* Tezde ondalıktan sonra nokta kullanımı tercih edilmiştir.

## ŞEKİLLER DİZİNİ

|                                                                                                                                             |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 1.1. a) Boşluklara nüfuz etme işlemi sırasında çimento harcı gözenekli asfalt iskelet b) yarı rijit kaplamasının karot numunesi ..... | 2  |
| Şekil 3.1. Harçta oluşan segregasyon .....                                                                                                  | 9  |
| Şekil 3.2. Elek sallama cihazı .....                                                                                                        | 13 |
| Şekil 3.3. Los Angeles aşınma deneyi .....                                                                                                  | 14 |
| Şekil 3.4. İri agreganın kurutulması ve hazırlanması .....                                                                                  | 15 |
| Şekil 3.5. İnce agreganın suya doymun kuru yüzey hale getirilmesi.....                                                                      | 16 |
| Şekil 3.6. Soyulma deneyi, petri kabındaki numuneler .....                                                                                  | 18 |
| Şekil 3.7. Metilen mavisi deneyi .....                                                                                                      | 19 |
| Şekil 3.8. Yumuşama noktası deneyi.....                                                                                                     | 21 |
| Şekil 3.9. Parlama noktası deneyi .....                                                                                                     | 21 |
| Şekil 3.10. Düktilite deneyi, bitümün koptuğu an .....                                                                                      | 22 |
| Şekil 3.11. TFOT cihazı.....                                                                                                                | 23 |
| Şekil 3.12. Harcın segregasyon hali.....                                                                                                    | 24 |
| Şekil 3.13. Hazırlanan çimento harçlarına ilişkin numuneler.....                                                                            | 25 |
| Şekil 3.14. Kullanılan akışkanlık hunisi .....                                                                                              | 26 |
| Şekil 3.15. Terleme yüzdesinin bulunması .....                                                                                              | 27 |
| Şekil 3.16. Eğilme dayanımı deneyi .....                                                                                                    | 28 |
| Şekil 3.17. Basınç dayanımı deneyi.....                                                                                                     | 29 |
| Şekil 3.18. Büzülme deneyi .....                                                                                                            | 30 |
| Şekil 3.19. Poroza asfaltın gradasyon eğrisi.....                                                                                           | 31 |
| Şekil 3.20. YRK üretim aşamaları .....                                                                                                      | 32 |
| Şekil 3.21. Harcın poroza yerleştirilmesi ve karot numunelerinin elde edilmesi .....                                                        | 32 |
| Şekil 3.22. Marshall stabilite ve akma deneyi .....                                                                                         | 33 |
| Şekil 3.23. Nem hasarına karşı direnç deneyi.....                                                                                           | 35 |
| Şekil 3.24. Basınç dayanımı deneyi.....                                                                                                     | 36 |
| Şekil 3.25. Donma çözülme deneyi numuneleri .....                                                                                           | 37 |
| Şekil 3.26. Düşey permeabilite deneyi .....                                                                                                 | 39 |
| Şekil 3.27. Cantabro deneyi .....                                                                                                           | 40 |
| Şekil 3.28. Yüzey pürüzlülüğü deneyi.....                                                                                                   | 41 |
| Şekil 4.1. YFC katkılı numunelerin akışkanlık sonuçları .....                                                                               | 47 |
| Şekil 4.2. YFC içerikli çimento harçlarının basınç dayanımı değerleri.....                                                                  | 48 |
| Şekil 4.3. YFC içerikli çimento harçlarının eğilme dayanımı değerleri.....                                                                  | 49 |
| Şekil 4.4. YFC içerikli çimento harçlarının kuruma büzülmesi değerleri .....                                                                | 50 |
| Şekil 4.5. YFC içerikli çimento harçlarının terleme yüzdesi değerleri.....                                                                  | 51 |
| Şekil 4.6. MK katkılı çimento harçlarının akışkanlık süreleri .....                                                                         | 53 |
| Şekil 4.7. MK ve kontrol numunelerin çimento harçlarının basınç dayanımı değerleri.....                                                     | 54 |
| Şekil 4.8. MK içerikli çimento harçlarının eğilme dayanımı değerleri .....                                                                  | 55 |
| Şekil 4.9. MK içerikli çimento harçlarının kuruma büzülmesi değerleri .....                                                                 | 56 |
| Şekil 4.10. MK içerikli çimento harçlarının terleme yüzdesi değerleri.....                                                                  | 56 |

|                                                                                |    |
|--------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil 4.11.</b> YRK numunelerinin Marshall stabilite sonuçları .....        | 58 |
| <b>Şekil 4.12.</b> YRK numunelerinin akma sonuçları .....                      | 59 |
| <b>Şekil 4.13.</b> YRK numunelerinin İÇMO sonuçları .....                      | 60 |
| <b>Şekil 4.14.</b> YRK numunelerinin basınç dayanımı değerleri .....           | 61 |
| <b>Şekil 4.15.</b> YRK numunelerinin Cantabro değerleri.....                   | 61 |
| <b>Şekil 4.16.</b> KN, YFC ve MK katkılı YRK'nın donma-çözülme değerleri ..... | 62 |



## ÇİZELGELER DİZİNİ

|                                                                                     |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Çizelge 2.1. SHRP Değerlendirmesinden Laboratuvar Sonuçlarının Özeti .....          | 3  |
| Çizelge 2.2. Metakaolinin kimyasal bileşimi.....                                    | 4  |
| Çizelge 2.3. Metakaolinin fiziksel özellikleri .....                                | 5  |
| Çizelge 3.1. CEM I 42.5 tipi çimentonun fiziksel özellikleri .....                  | 7  |
| Çizelge 3.2. CEM I 42.5 tipi çimentonun kimyasal özellikleri .....                  | 7  |
| Çizelge 3.3. Süper akışkanlaştırıcının özellikleri .....                            | 8  |
| Çizelge 3.4. Metakaolinin fiziksel özellikleri .....                                | 10 |
| Çizelge 3.5. Metakaolinin kimyasal bileşimi.....                                    | 10 |
| Çizelge 3.6. Yüksek fırın cürufunun kimyasal özellikleri .....                      | 11 |
| Çizelge 3.7. Yüksek fırın cürufunun fiziksel özellikleri.....                       | 11 |
| Çizelge 3.8. Selüloz fiber fiziksel özellikleri.....                                | 12 |
| Çizelge 3.9. Kullanılan agreganın elek analizi .....                                | 25 |
| Çizelge 3.10. poroz asfaltın gradasyonu .....                                       | 31 |
| Çizelge 3.11. Poroz asfaltın özellikleri .....                                      | 31 |
| Çizelge 3.12. YRK deneyleri .....                                                   | 33 |
| Çizelge 4.1. Kaba agrega deneylerinin sonuçları.....                                | 42 |
| Çizelge 4.2. İnce agrega deneylerinin sonuçları .....                               | 42 |
| Çizelge 4.3. Bitüm deneylerin sonuçları.....                                        | 43 |
| Çizelge 4.4. Beyaz çimento deneylerin sonuçları.....                                | 44 |
| Çizelge 4.5. YFC katkılı harçlara yapılan ön deneylerin sonuçları .....             | 45 |
| Çizelge 4.6. Seçilen YFC katkılı çimento harçlarının içeriği .....                  | 47 |
| Çizelge 4.7. MK katkılı harçlara yapılan ön deneylerin sonuçları .....              | 52 |
| Çizelge 4.8. MK katkılı harçların içerikleri .....                                  | 53 |
| Çizelge 4.9. Kontrol numunesi, YFC ve MK katkılı YRK'lerin stabilite sonuçları..... | 58 |
| Çizelge 4.10. Kontrol numune, YFC ve MK katkılı YRK'nın akma sonuçları.....         | 58 |
| Çizelge 4.11. YRK numunelerinin İÇMO sonuçları .....                                | 59 |
| Çizelge 4.12. YRK numunelerinin basınç dayanımları .....                            | 60 |
| Çizelge 4.13. YRK numunelerinin düşey ve yatay permeabilite sonuçları .....         | 62 |
| Çizelge 4.14. YRK numunelerinin yüzey pürüzlülüğü sonuçları .....                   | 63 |

## 1. GİRİŞ

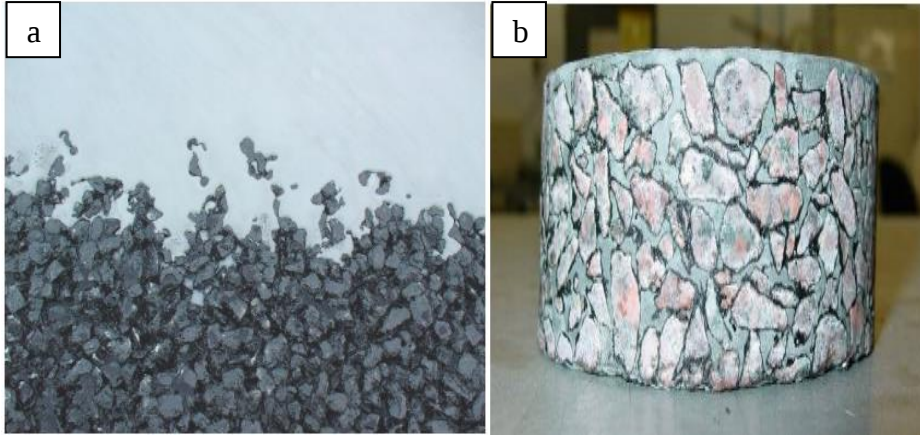
Karayolu, insanların ve malların güvenli ve etkin bir şekilde taşınmasını sağlamak için yolların planlanması, tasarımı, yapımı, işletilmesi ve bakımını içeren inşaat mühendisliği içerisinde yer alan bir mühendislik disiplindir (Rogers 2016). Karayolu standartları sürekli olarak geliştirilmektedir. Türkiye’de de gün geçtikçe nüfus ve araç sayısı artmaktadır. Bu nedenle, karayoluna daha fazla ihtiyaç duyulmaktadır.

Esnek kaplama olan asfalt kaplamalar sürüş kalitesi, mekanik performans ve güvenli yüzey özellikleri nedeniyle yolcu ve yük taşımacılığında çoğunlukla tercih edilmektedir (Bonicelli 2019). Esnek kaplamaların tasarımı, yapımı ve tamiri kolaydır. Esnek kaplamalar daha az ses kirliliğine sahipken aynı zamanda esnek kaplamalarda boyuna ve enine derzler de yoktur. Ancak esnek kaplamaların da dezavantajları bulunmaktadır. Örneğin, siyah yüzeyi ile kentsel ısı adalarının oluşmasına sebep olması ve esnek kaplamanın ana unsuru olan bitümün viskoelastik yapısı nedeniyle yüksek sıcaklıklarda mukavemetini kaybetmesidir.

Taşımacılıkta yaygın olarak kullanılan diğer bir üst yapı tipi rijit kaplamalardır (Gong 2019). Rijit kaplamanın bazı avantajları vardır. Öncelikle rijit kaplamalar yüksek dayanıma sahip olduğu için yüklerin karşısında esnek kaplamalara göre daha yüksek dayanım gösterir. Rijit kaplamaların tamiri esnek kaplamalara göre daha zordur. Rijit kaplamanın yüzeyi parlaktır ve bu da sürüş güvenliği açısından zafiyet doğurmaktadır. Rijit kaplamanın başlangıç maliyeti ve bakım maliyeti de yüksektir. Bu gibi eksikliklerin üstesinden gelinmesi ve hem esnek hem de rijit kaplamaların performanslarının artırılması için YRK geliştirilmiştir (Zarei 2020).

YRK, %25–35 hava boşluğu içeriğine sahip açık gradasyonlu matris asfalt karışımının yüksek performanslı çimento harcı ile doldurulmasıyla oluşan kompozit kaplama malzemesidir. YRK; derzsiz yapı, yüksek mukavemet, sızdırmazlık, yüksek dayanıklılığın yanı sıra yakıt direnci avantajları nedeniyle endüstriyel zeminler, otobüs terminalleri, park alanları, yükleme platformları ve diğer alanlar gibi yoğun trafik alanlarının inşasında ve yenilenmesinde uygulanmaktadır (Zarei 2020).

YRK genel olarak, çok açık gözenekli bir asfalt iskeleti içine akışkan harcın doldurulmasıyla inşa edilmektedir. Burada kullanılan çimento bazlı akışkan harcın erken dönem (1-3-7 gün) ve uzun dönem (28 gün) performansının incelenmesi gerekmektedir. Poroz asfalt ve akışkan çimento harçtan oluşan yarı rijit kaplama hem rijit beton hem de esnek üstyapının en iyi özelliklerine sahip olan ve geleneksel aşınma tabakasının yerini alması beklenen bir üst yapı tipidir (Husain 2010). Bu doğrultuda YRK’ye ilişkin görseller Şekil 1.1’de gösterilmiştir (Oliveira 2006).



**Şekil 1.1. a)** Boşluklara nüfuz etme işlemi sırasında çimento harcı gözenekli asfalt iskelet **b)** yarı rijit kaplamasının karot numunesi

Bu tezin amacı, metakaolin ve yüksek fırın cürufu ile performansı iyileştirilen özel bir çimento harcı ile doldurulmuş açık dereceli asfalt betonunun performans özelliklerini değerlendirmek ve bu özellikleri sıcak asfalt beton ile karşılaştırmaktır. Bu kapsamda tez çalışmasının ikinci kısmında YRK ile ilgili literatür araştırması yapılmıştır. Üçüncü kısımda metakaolin ve yüksek fırın cürufuyla harç numuneleri üretilmiş, bu numunelerin akışkanlık, terleme, büzülme, basınç ve eğilme dayanımı gibi performans özelliklerine bakılmıştır. Aynı zamanda 5x50x200 cm boyutlarında kalıplarda YRK üretilmiştir. Bulgular ve tartışmaların incelendiği dördüncü kısımda ise gerçekleştirilen performans deneylerinin sonuçları değerlendirilmiştir. Son olarak tezin beşinci kısımda ise elde edilen sonuçlara göre gelecekte yapılabilecek çalışmalara yönelik önerilerde bulunulmuştur.

## 2. KAYNAK TARAMASI

Yarı rijit kaplama ile ilgili literatür çalışması şu şekildedir;

Şahan (2006), CEM 1 42.5 R çimentolu beton karışımına yüksek fırın cürufu ekleyerek, bu katkı malzemesinin beton üzerindeki etkisini incelemiştir. Bu çalışmaya göre yüksek fırın cürufu ile hazırlanan betonun dayanımı 28 günlük süreçte normal betonun dayanımına yakın iken, 28 günden sonraki süreçte yüksek fırın cürufu ile hazırlanan betonun dayanımı daha yüksek çıkmaktadır. Buna ek olarak yüksek fırın cürufu ilavesi ile betonun işlenebilirliğinin arttığı ve suya olan ihtiyacının azaldığı görülmüştür.

Yazıcı vd. (2010), deneysel çalışmalarında çeşitli oranlarda metakaolin içeren çimento harçları hazırlayarak, bu harçların mukavemet dayanımlarını incelemiştir. Bu çalışmada hazırlanan numunelerin 1, 3, 7, 28, 56, 90 ve 180 günlük kürleme işleminden sonra basınç ve eğilme dayanımları tayin edilmiştir. Yapılan çalışmaya göre metakaolinin, çimento harcının erken yaşlarda basınç ve eğilme dayanımını iyileştirdiği anlaşılmıştır.

De Oliveira (2006), Strategic Highway Research Program (SHRP) dahilinde yapmış olduğu çalışmada esnek kaplama ile YRK'yi kıyaslamış ve sonuçlarını Çizelge 1'deki gibi göstermiştir. Bu çizelgeye göre YRK'nin mekanik ve durabilite özelliklerinin esnek kaplamaya eşit ya da daha iyi olduğu ifade edilmiştir. Esneklik Modülü değerleri, karışımın bileşimine ve kullanılan test tipine bağlı olarak 20 °C'de 6000 ila 10000 MPa aralığında elde edilmiştir.

**Çizelge 2.1.** SHRP Değerlendirmesinden Laboratuvar Sonuçlarının Özeti (De Oliveira 2006)

| Malzemelerin özellikleri | Esnek kaplama | YRK       |
|--------------------------|---------------|-----------|
| Marşal stabilite(kN)     | 8.7           | 19.0      |
| Çekme Dayanımı (kPa)     | 715           | 985       |
| Çekme Dayanımı Oranı     | -             | -         |
| Su hassasiyeti           | 0.87          | 0.72      |
| Donma-çözünme            | 0.70          | 0.66-0.89 |
| Esneklik Modülü (MPa)    | 2040          | 4937      |
| Esneklik Modülü oranı    | -             | -         |
| Su hassasiyeti           | 0.83          | 0.82      |
| Donma-çözünme            | 0.68          | 0.51-0.78 |
| Basınç dayanım           | 1.2           | 5.5       |

Siddique ve Klaus (2009), yaptıkları çalışmada metakaolini puzolanik olarak harç ve çimentoda kullanmışlardır. Metakaolinin, beton ve harç üzerinde mekanik ve durabilite bakımından etkisi olduğunu belirtmişlerdir. Kilin 500-800 °C de ısıtılmasıyla metakaolin elde edebildikleri sonucuna varmışlardır.

Sakthivel vd. (2019), yaptıkları deneysel çalışmada, portland çimentosu, uçucu kül ve öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun ikili ve üçlü karışımları ile oluşturulan beton numunelerin basınç dayanımını ve bu katkıların elastisite modülü üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Bu çalışmada farklı su/çimento oranlarında 54 beton karışımı hazırlanmıştır. Hazırlanan karışımlarda su/çimento oranı 0.50-0.65 aralığında değişmektedir. Yapılan çalışmaya göre öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun ilavesinin hem kısa hem de uzun vadeli dayanıma katkı sağladığı anlaşılmıştır.

Ambroise vd. (1994), yaptıkları çalışmada, puzolanik özelliklere sahip bir malzeme olan metakaolin kullanmışlardır. Metakaolin; trikalsiyum silikat ve trikalsiyum alüminattan oluşmaktadır. Çalışmada metakaolin içeren harçlar erken hidratasyon ve iletkenlik kullanılarak incelenmiştir. Kalsiyum hidroksit tüketimini takip etmek ve reaksiyon ürünlerini belirlemek için farklı termal analiz, X-ışını kırınımı ve Fourier dönüşümü kızılötesi spektrometrisi kullanmışlardır. Basınç dayanımı ve gözeneklilik özellikleri belirlenmiştir. Çalışma sonucunda, kalsiyum hidroksitin hızla tüketildiğini, mikro yapının kalsiyum silikat hidrat ve stratlingite açısından zengin olduğunu ve gözenek boyutu dağılımının daha küçük değerlere doğru yer değiştirdiği sonucuna varmışlardır. Kullanmış oldukları metakaolinin kimyasal bileşimi Çizelge 2.2’de gösterilmiştir (Ambroise vd. 1994).

**Çizelge 2.2. Metakaolinin kimyasal bileşimi**

|                                | <b>Kütle olarak %</b> |
|--------------------------------|-----------------------|
| SiO <sub>2</sub>               | 51.52                 |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 40.18                 |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 1.23                  |
| CaO                            | 2.0                   |
| MgO                            | 0.12                  |
| K <sub>2</sub> O               | 0.53                  |
| SO <sub>3</sub>                | 0.0                   |
| TiO <sub>2</sub>               | 2.27                  |
| Na <sub>2</sub> O              | 0.08                  |
| L.O.I                          | 2.01                  |

Çizelge 2.3'te metakaoline ait fiziksel özellikler gösterilmiştir (Anonim 1 2022).

**Çizelge 2.3.** Metakaolinin fiziksel özellikleri

| Özellik                              | Değer       |
|--------------------------------------|-------------|
| Spesifik yer çekimi                  | 2.60        |
| Yığın yoğunluğu (g/cm <sup>3</sup> ) | 0.4         |
| Fiziksel form                        | Toz         |
| Renk                                 | Kırık beyaz |
| GE Parlaklığı                        | 80–82       |

Hassani vd. (2020) çalışmalarında, yarı rijit kaplamada esneklik için asfalt tabakadan ve yüksek mukavemet için (sertlik) beton tabakadan yararlanmışlardır. Bu çalışmalarında; yarı rijit kaplamanın tasarımı, yapımı ve performansı için kapsamlı olarak incelemeler yapmışlardır. YRK'nin; beton kaplamalara göre daha düşük ilk yapım maliyetine, daha yüksek yüzey parlaklığına, yüksek dayanıklılığa, yüksek tekerlek izi direncine sahip olması gibi önemli özellikleri nedeniyle, asfalt ve beton kaplamalara bir alternatif olarak kabul edilebileceği sonucuna varmışlardır.

Türkel ve Tevrişci (2015) yaptıkları deneysel çalışmada; çimento harcı yapımında çimento yerine farklı oranlarda metakaolin ikame etmiş ve ikinci grup numunelerde ise süperakışkanlaştırıcı katkı kullanmışlardır. Yapılan deneylerin sonucunda kullanılan katkı maddeleri sayesinde çimento harçlarının mukavemet değerlerinin iyileştiği, harçların Alkali Silikat Reaksiyonu genleşmesi ve klor geçirimsizliği açısından olumlu katkısı olduğu bulunmuştur.

Qian ve Li (2001), %0, %5, %10 ve %15 oranlarında metakaolin içeren beton için gerilme-şekil değiştirme ilişkileri (gerilme ve sıkıştırma) ve eğilme mukavemeti ölçümlerine ilişkin bir çalışma yapmışlardır. Yaptıkları testlere göre, artan metakaolin içeriği ile çekme mukavemeti ve pik gerilmenin arttığı, buna karşın çekme elastik modülünün sadece küçük değişiklikler gösterdiği sonucuna varmışlardır. Artan metakaolin içeriği ile bağ mukavemeti ve basınç mukavemetinin arttığı gözlenmiştir. Betonun basınç elastisite modülü, artan metakaolin ikamesi ile küçük bir artış göstermektedir. Metakaolin erken basınç dayanımı önemli ölçüde arttırmakta ve ayrıca daha yüksek uzun süreli dayanıma katkı sağlamaktadır. Bu nedenle metakaolin, çok etkili bir mukavemet arttırıcı katkı maddesi olduğu sonucuna varılmıştır.

Hu vd. (2022), çalışmalarında asit yağmuru etkisi altında yarı esnek numuneleri periyodik olarak kürlendirmişlerdir. Asit yağmuru etkisi altında yarı esnek kaplamanın performansı, su stabilitesi, standart Marshall testi, donma-çözülme, yarmada çekme testi ve vakumla doyurma testi ile makroskobik olarak değerlendirilmiştir. Çalışmanın sonucunda, farklı asit yağmuru türleri altında yarı esnek kaplamanın performansının farklı derecelerde düşüş gösterdiği sonucuna varılmıştır.

Spadoni vd. (2022), çalışmalarında YRK'nin yüksek rijitliği ve tekerlek izi direncinin yanı sıra kimyasallara dayanıklılığı ve derzsiz yüzeyi ile öne çıktığını belirtmişlerdir. YRK'nin limanlar, havaalanları ve endüstriyel yapılar tarafından talep edilen tüm mühendislik özelliklerini karşılayabilmesine rağmen, bu konuda dünya

apında halen çok az uygulama bulunduğunu ve mekanik özelliklerinin yeterince derinlemesine araştırılmadığını ifade etmişlerdir. Çalışmanın temel amacı sahada ve laboratuvarda üretilen YRK karışımlarının rijitliğini, yorulma direncini ve çatlama yayılma direncini karşılaştırma olarak belirtilmişlerdir. Deneysel çalışmalarında laboratuvar numunelerin ısıl duyarlılığını ve dağılma direncini de değerlendirmişlerdir. Deneysel çalışmanın sonucunda, harcın sertleştirici katkısının özellikle yüksek deformasyon seviyelerinde yorulma ömrünü iyileştirdiği sonucuna varılmıştır.

Khan vd. (2021), çalışmalarında; özellikleri farklı üç tip imento esaslı harç (kontrol harcı, normal atık polietilen tereftalat içeren bir harç ve gama ışınlanmış atık polietilen tereftalat içeren bir harç) içeren yarı esnek karışımları incelemişlerdir ve elde ettikleri sonucu geleneksel sıcak karışım asfaltın performansıyla karşılaştırmışlardır. Test sonuçları, %100 imento esaslı harç içeren yarı esnek kontrol numunelerinin özelliklerinin, çimentonun kısmi ikamesi olarak %2.75 normal polietilen tereftalat içeren numunelerle eşleştirilebileceğini göstermiştir.

### 3. MATERYAL VE METOT

Bu tez çalışmasında; YFC ve MK içeren çimento harcının nasıl elde edildiği ve poroz asfalt boşluklarının içine eklenen bu harç ile elde edilen YRK'nin performansı incelenmiştir. Bu amaç ile ilk olarak 8 farklı harç dizaynına basınç, eğilme ve büzülme deneyleri yapılmıştır. Daha sonra 8 farklı karışımdan seçilen en verimli harç poroz asfalt içine dökülüp karot numuneleri alınmıştır. Karot numuneleri Marshall stabilite testi, permeabilite testi, Cantabro testi, donma çözülme testi ve indirekt çekme dayanımı deneylerine tabi tutulmuştur. Ayrıca; yüksek fırın cürufu ve metakaolin katkı maddelerinin elde edilen YRK dizaynına etkilere incelenmiştir.

#### 3.1. Materyal

##### 3.1.1. Çimento

Bu tez çalışmasında beyaz çimento ve CEM I 42.5 R çimento tipleri kullanılmıştır. R harfi çimentonun erken dayanımın yüksek olduğunu göstermektedir.

**Çizelge 3.1.** CEM I 42.5 tipi çimentonun fiziksel özellikleri

| Fiziksel Özellikler                          | Sonuçlar | TS EN 197-1'e göre gereklilikler | Analiz Metodu |
|----------------------------------------------|----------|----------------------------------|---------------|
| Priz başlama süresi                          | 156      | En az 60                         | EN 196-1      |
| Genleşme, mm                                 | 0.46     | En çok 10                        | EN 196-1      |
| Basınç Dayanımı 2 Günlük, N/mm <sup>2</sup>  | 24.3     | En az 20                         | EN 196-1      |
| Basınç dayanımı 28 Günlük, N/mm <sup>2</sup> | 50.1     | 42.5-62.5                        | EN 196-1      |

**Çizelge 3.2.** CEM I 42.5 tipi çimentonun kimyasal özellikleri

| Kimyasal Özellikler   | Sonuçlar | TS EN 197-1'e göre gereklilikler | Analiz Metodu        |
|-----------------------|----------|----------------------------------|----------------------|
| Kızdırma Kaybı, %     | 3.13     | En çok 5                         | EN 196-2             |
| Çözünmeyen Kalıntı, % | 0.50     | En çok 5                         | EN 196-2             |
| Cl, %                 | 0.004    | En çok 0.1                       | EN 196-2             |
| SO, %                 | 2.75     | EN 196-2                         | En çok 4<br>EN 196-2 |

### 3.1.2. Agregalar

Deneyisel çalışmalarda kullanılan agregaların cinsi kalkerdir. Agregaların cinsi ve derecelendirilmesi, üstyapının özelliklerini etkilemektedir. Kalker sağladığı faydalar nedeniyle inşaat sektöründe kullanımı giderek artırmaktadır (Aquino ve diğ. 2010). Çimento esaslı harcın ikamesi olarak ince kalker ilavesinin aynı su/çimento oranında ve aynı küp mukavemetinde bile betonun çekme mukavemetini, sertliğini ve dayanıklılığını iyileştireceğini göstermiştir (Li ve diğ. 2015).

Agregalar; doğal agregalar, yapay agregalar olarak sınıflandırılır. Doğal agregalar toplandığı yere göre nehir agregası, deniz agregası vb. olarak sınıflandırılmaktadır. Yapay agregalar genellikle atık malzemelerden ve değer yollarda elde edilmektedir. Taş ve çakıl kırma sürecinde daha küçük parçalara ayrılmaktadır. Elemeler sonucunda; 4.75 mm altında parça boyutuna sahip agregalar ince agregayı oluşturmaktadır. Deneyisel çalışmalarda kullanılan agregalar aşağıdaki özellikleri sağlamalıdır;

- Agregayı kullanırken, miktarı ve kalitesi kontrol edilmelidir. Farklı tipteki agregaların karışmasını ve kirlenmesini önlemek için ayrı ayrı depolanması gerekmektedir. Ayrıca, çamur veya diğer yabancı maddeler agregalardan uzaklaştırılmalıdır.
- Bir asfalt karışımı için agrega kullanıldığında, agrega ile bitümlü malzeme arasındaki yapışma, agreganın özelliklerinden ve ortam koşullarından etkilemektedir. Agreganın geçmiş performansı göz önünde bulundurularak incelendiğinde, eğer yapışmasında bir sorun ortaya çıkarsa; soyulmayı önleyici sönmüş kireç, polimer modifiye asfalt veya diğer malzemeler kullanarak agrega kalitesi artırılır.

### 3.1.3. Süper akışkanlaştırıcı

Bu çalışmada polikarboksilat esaslı süperakışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Bu katkı malzemesi harcın kıvamını ve dayanımını iyileştirmektedir. Tez çalışmasında kullanılan süper akışkanlaştırıcı avantajları; harcın daha kolay yerleşmesi, harç içerisindeki su miktarını azaltılabilmesi, harcın suya ve dona karşı direncinin artmasıdır.

**Çizelge 3.3. Süper akışkanlaştırıcının özellikleri**

| Kimyasal İçerik | Polikarboksilat Esaslı |
|-----------------|------------------------|
| Yoğunluk        | 1.07 – 1.13 kg/l       |
| pH              | 4.0 – 6.0              |
| Renk            | Kahverengi             |
| Toplam Klor     | Maksimum 0.1%          |
| Alkali İçeriği  | <5%                    |

Tez çalışmasında kullanılan süper akışkanlaştırıcı oranları, kullanılan katkı cinlerine göre şu şekilde belirlenmiştir: Yüksek fırın cürufu (YFC) içerikli harca %0.4 ve %0.8 oranlarında iyi kıvam ve akışkanlığa sahip olması için eklenmiştir. Deneysel çalışmalarda YFC'deki harca %0.6 ve üzerinde süper akışkanlaştırıcı kullanılmasının segregasyona ve kismaya sebep olduğu tespit edilmiştir.



**Şekil 3.1.** Harçta oluşan segregasyon

Süper akışkanlaştırıcı kimyasal katkı, metakaolin içerikli harçta %0.7 oranında kullanılmıştır. Süper akışkanlaştırıcı katkı, metakaolin içerikli harçta yüksek fırın cürufu içerikli harca göre daha az segregasyona neden olmuştur.

#### **3.1.4. Yüksek fırın cürufu ve metakaolin**

Bu çalışmada yüksek fırın cürufu atık malzemesi ve metakaolin, harcın dayanımını arttırmak için kullanılmıştır. Yüksek fırın cürufu ve metakaolin harç karışımında çimento yerine belli bir oranda kullanılmıştır. Yüksek fırın cürufu, demir-çelik üretimi esnasında atık malzeme olarak çıkmaktadır. Metakaolin ise kilin 650-700 dereceye kadar ısıtılmasıyla elde edilmektedir. Metakaolinin fiziksel özellikleri (Anonim 1) Çizelge 3.4'te, kimyasal özellikleri Çizelge 3.5'te (Ambroise vd. 1994) gösterilmiştir. Yüksek fırın cürufunun kimyasal özellikleri Çizelge 3.6'da (Aslani ve Asif 2019), fiziksel özellikleri ise Çizelge 3.7'de gösterilmiştir (Aslani ve Asif 2019).

**Çizelge 3.4.** Metakaolinin fiziksel özellikleri

| Özellik                          | Değer   |
|----------------------------------|---------|
| Spesifik yer çekimi              | 2.6     |
| Özgür ağırlık gr/cm <sup>3</sup> | 0.3-0.4 |
| Fiziksel yapı                    | Toz     |
| Renk                             | Beyaz   |
| GE parlığı                       | 79-82   |

**Çizelge 3.5.** Metakaolinin kimyasal bileşimi

| Kimyasal Bileşim               | Kütle olarak % |
|--------------------------------|----------------|
| SiO <sub>2</sub>               | 51.52          |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 40.18          |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 1.23           |
| CaO                            | 2.0            |
| MgO                            | 0.12           |
| K <sub>2</sub> O               | 0.53           |
| SO <sub>3</sub>                | 0.0            |
| TiO <sub>2</sub>               | 2.27           |
| Na <sub>2</sub> O              | 0.08           |
| L.O.I                          | 2.01           |

**Çizelge 3.6.** Yüksek fırın cürufunun kimyasal özellikleri

| Özellikleri                    | Değer  |
|--------------------------------|--------|
| CaO                            | 42%    |
| SiO <sub>2</sub>               | 31%    |
| S                              | 0.4%   |
| SO <sub>3</sub>                | 2.40%  |
| MgO                            | 5.70%  |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 12.70% |
| FeO                            | 0.80%  |
| MnO                            | 0.10%  |
| Cl                             | 0.01%  |
| Çözünmeyen kalıntı içeriği     | 0.20%  |

**Çizelge 3.7.** Yüksek fırın cürufunun fiziksel özellikleri

| Özellikler            | Değer   |
|-----------------------|---------|
| Spesifik yer çekimi   | 3.0-3.2 |
| Su ihtiyacı           | 103.00% |
| Akkor kaybı           | 0.20%   |
| Rölatif dayanım       | 100.00% |
| Sıcaklık artışı       | 18.8 °C |
| İncelik (geçen 45 µm) | 98.00%  |

### 3.1.5. Fiber

Bu çalışmada selüloz fiber kullanılmıştır. Bu tip fiberler bitkilerin yapraklarından ve odundan elde edilmektedir. Selüloz fiberlerin yüzey alanı, mineral fiberler ve polyester fiberlerden 10 kat daha fazladır. Bu durum selüloz fiberlerin daha fazla agregaların arasından bitümün süzülmesini engellemesini sağlamaktadır. Ayrıca fiber poroz asfaltın tekerlek izi direncini iyileştirmektedir. Selüloz fiber, bağlayıcılar ile birlikte kaplamanın kopma direncini de arttırmaktadır. Selüloz fiberin bağlayıcılık etkisi yüksek olduğu için kullanıldığı karışımın Marshall stabilite değerini artırır (Gupta vd. 2019).

**Çizelge 3.8.** Selüloz fiber fiziksel özellikleri

| Özellikler            | Sonuçlar        |
|-----------------------|-----------------|
| Görünüm               | Granül elyaf    |
| Renk                  | Kahverengi      |
| Bileşim               | Selülozik elyaf |
| Palet çapı            | 7 mm            |
| Yoğunluk, g/l         | 450             |
| Ortalama lif uzunluğu | 2 mm            |
| Isıl dayanımı, °C     | >250            |

### 3.1.6. Bitüm

Bitüm, yapay ve doğal bitüm olarak iki sınıfa ayrılmaktadır. Yapay bitümler petrol bileşiklerinden elde edilmektedir. Bitüm yapışkan, siyah renkli, yüksek viskoziteli, visko elastik özelliği olan bir yapı malzemesidir. Bu tez kapsamında kullanılan bitüm, Antalya Muratpaşa Belediyesi Asfalt üretim tesisinden temin edilmiş olup, B50/70 penetrasyon sınıfındadır. Deneysel çalışmalarda kullanılan bitüme yumuşama noktası, penetrasyon, parlama noktası, duktilite ve ince film halinde ısıtma kaybı deneyleri yapılarak bitümün teknik özellikleri incelenmiştir.

### 3.2. Metot

#### 3.2.1. Agregat deneyleri

##### 3.2.1.1. Elek analizi deneyi

Elek analizi deneyi, TS EN 933-2 standardına göre yapılmıştır. Elek analiz ile ilgili deneysel çalışmalarda, numuneler 0.1 hassasiyetiyle tartılmıştır. Agregalar elek sallama makinesinde ortalama 4 iki dakika elenerek hazırlanmıştır. Bu deneyin amacı, agregaların bir dizi elekten geçmesine izin verilerek, agregaların parçacık boyutu dağılımının belirlenmesidir. Elek üzerinde kalan agregaların ağırlıkları yüzdesel olarak Denklem 3.1 yardımı ile hesaplanmıştır.

$$P_s = \frac{W_s}{W_i} * 100 \quad (3.1)$$

Burada,

$P_s$ : Elek üstünde kalan malzeme oranı (%)

$W_s$ : Elek üstünde kalan malzeme miktarı (gr)

$W_i$ : Deney numune miktarı (gr)



Şekil 3.2. Elek sallama cihazı

### 3.2.1.2. Los Angeles deneyi (Aşınma kaybı)

Los Angeles Deneyi ASTM C 131 standardına göre yapılmıştır. Los Angeles deneyinde kullanılan deney numuneleri agrega dane boyutlarına göre A, B, C, D, E, F ve G tipi şeklinde sınıflandırılmaktadır. Dane sınıfına göre deney numunesi ve miktarı belirlenmiştir.

Tez çalışmasında Los Angeles deneyinde, numune tipi belirlenen agregalar için 11 çelik bilye ile aşındırma yükü uygulanmıştır. Daha sonra deney numuneleri bilyelerle birlikte tambur içine konulup kapağı sıkıca kapatılmıştır. Deneyin amacı bitümlü sıcak kaplamalarda kullanılacak agregaların ezilmeye, darbelenmeye ve dağılmaya karşı gösterdiği direncin bulunmasıdır. Deney sonucu aşınma oranı aşağıdaki formüller kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\text{Aşınma oranı} = \frac{A-B}{A} \times 100 \quad (3.2)$$

Burada;

A: Agreganın aşınmadan önce ağırlığı, gr

B: Agreganın aşınmadan sonra ağırlığı, gr



Şekil 3.3. Los Angeles aşınma deneyi

### 3.2.1.4. İri agrega özgül ağırlık ve su emme deneyi

İri agrega özgül ağırlık ve su emme deneyinde, ASTM C127 standartları esas alınmıştır. Bu deneyin amacı 4.75 mm elek üzerinde kalan agregaların özgül ağırlık ve su emme oranının belirlenmesidir. Özgül ağırlık 25 °C sıcaklıktaki agregaların birim hacminin kütlesinin, aynı sıcaklıktaki eşit hacimdeki suyun kütlesine oranıdır.

İri agrega özgül ağırlık ve su emme deneyinde; deneysel çalışmalarda kullanılan poroz asfalt gradasyonuna uygun olarak 4.75 mm üzeri agregadan oluşan 2 kg agrega hazırlanır. Agregada gradasyonuna uygun olarak iki farklı gradasyonda numunelerin ağırlığı tartılır, agregalar yıkanır. Agregalar su dolu bir kaptan 24 saat bekletilir. 24 saat sonunda suyu süzülen agregaların yüzeyi bir kumaş parçası ile kurulur. Bu sayede agregalar suya doymuş kuru yüzey durumuna getirilir. Suya doymuş kuru yüzey halindeki agregaların ağırlığı bulunur. Daha sonra tel sepet içerisine konan agrega numuneleri su dolu bir kaba daldırılır ve su içerisindeki ağırlığı bulunur. Agregada taneleri arasında kalan hava boşluğunun çıkartılması için su dolu kaba plastik çekiçle vurulur. Islak agregalar 110±5 °C’de ki etüvde tamamen kuruyana kadar bekletilir ve ağırlığı tartılır. Deney sonucu özgül ağırlık ve su emme yüzdesi değerleri aşağıdaki formüller yardımı ile hesaplanmıştır.

$$\text{Hacim özgül ağırlığı} = \frac{A}{B-C} \quad (3.3)$$

$$\text{Su emme yüzdesi} = \frac{B-A}{A} \times 100 \quad (3.4)$$

$$\text{Yaş hacim özgül ağırlığı} = \frac{B}{B-C} \quad (3.5)$$

$$\text{Zahiri özgül ağırlığı} = \frac{A}{A-C} \quad (3.6)$$

Burada;

A: Numunenin kurutulmuş ağırlığı, gr

B: SDKY numunenin ağırlığı, gr

C: SDKY numunenin sudaki ağırlığı, gr



Şekil 3.4. İri agreganın kurutulması ve hazırlanması

### 3.2.1.5. İnce agreganın özgül ağırlık ve su emme deneyi

İnce agreganın özgül ağırlık ve su emme deneyinde, ASTM C 218 standartları esas alınmıştır. Bu deney 4.75 mm ile 0.075 mm elekler arasında kalan agregaların özgül ağırlık ve su emme oranını hesaplamak için yapılmaktadır.

İnce agreganın özgül ağırlık ve su emme deneyinde, agreganın gradasyonuna uygun olacak şekilde 4.75 mm-0.075 mm arası agregadan oluşan 1 kg numune kullanılır. Agregalar 0.075 mm eleğin içerisinde yıkanır. Agregalar su dolu bir kapta 24 saat bekletilir. 24 saat sonunda suyu süzülen agregalar sıcak hava kaynağı ile kurutulur. Bu sayede agregalar suya doymuş kuru yüzey durumuna getirilir. Suya doymuş kuru yüzey halindeki agregaların ağırlığı bulunur. Daha sonra piknometrenin içerisine bu agregadan konulur ve ağırlığı bulunur. Daha sonra piknometre üzerindeki seviyeye kadar su ile doldurulur ve tekrar ağırlığı bulunur. Piknometre içerisinden alınan numuneler etüv içerisinde nem kalmayana kadar kurutulur ve ağırlığı bulunur. DeneySEL değerler aşağıdaki formüller yardımıyla hesaplanmıştır.

$$\text{Hacim özgül ağırlığı} = \frac{E}{B+C-A-D} \quad (3.7)$$

$$\text{Su emme yüzdesi} = \frac{C-A}{B+C-A-D} \times 100 \quad (3.8)$$

$$\text{Yaş hacim özgül ağırlığı} = \frac{C-A}{B+C-A-D} \quad (3.9)$$

$$\text{Zahiri özgül ağırlığı} = \frac{E}{E-(D-B)} \quad (3.10)$$



Şekil 3.5. İnce agreganın suya doymuş kuru yüzey hale getirilmesi

### 3.2.1.6. Filler özgül ağırlık deneyi

Filler özgül ağırlık deneyi BS 812 standardına göre yapılmıştır. Bu deneyin amacı 200 nolu eleğin altında kalan agregaların özgül ağırlık değerinin bulunmasıdır. Filler agregası özgül ağırlık deneyinde sadece zahiri özgül ağırlık değeri hesaplanmaktadır. Zahiri özgül ağırlık değeri 25 °C'deki filler agregasının birim hacminin havadaki ağırlığının, 25 °C'deki ve birim hacimdeki suyun ağırlığına oranıdır. 0.075 mm açıklıklı elekten geçen agregadan 100 gr numune tartılmıştır. İki grup agregası numunesi hazırlanmıştır ve bu iki grup agregasının deney sonuçlarının ortalaması alınmıştır. İlk olarak piknometrelerin boş ağırlığı belirlenmiştir. Bir sonraki aşamada piknometre çizgisine kadar saf su eklenmiştir ve ağırlığı belirlenmiştir. Daha sonra piknometreler kuruması için etüve konulmuştur. Filler numuneleri piknometreye yerleştirilmiş ve tartılmıştır. Numune üzerine su ilave edilmiştir ve boşluk kalmaması için şişe titreşime maruz bırakılmıştır. Biriken köpükler alınmıştır ve numuneler tekrar tartılmıştır. Numuneler piknometreden çıkarılmıştır ve 110 °C etüvde kurutulmuştur. Kuru agreganın ağırlığı belirlenmiştir. Aşağıdaki formüllere göre zahiri özgül ağırlık hesaplanmıştır.

$$\text{Zahiri özgül ağırlığı} = \frac{C-A}{(B-A)-(D-C)} \quad (3.11)$$

Burada;

A: Piknometrenin ağırlığı, gr

B: Su dolu piknometrenin ağırlığı, gr

C: Piknometre ve fillerin ağırlığı, gr

D: Filler ve su dolu piknometrenin ağırlığı, gr

### 3.2.1.7. Yassılık indeksi deneyi

Bu deney BS 812 standardına göre yapılmıştır. Yassı agregalar kaplama yapımında kullanıldığında tekrarlanan yükleme ve titreşim altında agregaların aldığı yönlenme nedeniyle kaplamanın bozulmasına neden olabilmektedir. Bu deney ile bitümlü sıcak kaplamada kullanılan agregaların içerisindeki yassı daneli agregaların oranı belirlenmektedir. Deneyin esası, yassı agregası danelerinin deneyde kullanılan toplam agregası ağırlığına oranının belirlenmesine dayanmaktadır. Bir agregası ortalama yassılık eleğinde ilgili olduğu dane boyutunu 0.6'sından daha az bir kalınlığa sahipse, yassı olarak sınıflandırılır. Yassılık indeksi deneyi standart ölçülere sahip bir şablon ile yapılmaktadır. Terazisi yeterli kapasiteye sahip olmalı ve 0.1 gr hassasiyetle tartım yapabilmelidir. Elek 63.5 mm ile 6.3 mm arasında göz açıklığına sahip olmalıdır. Yassılık indeksi şablonundan agregalar teker teker geçirilmiştir. Agregası aralıklarına göre şablondan geçen agregaların ağırlıkları bulunmuş ve her agregası aralığı için teker

teker yassılık indeksi değeri hesaplanmıştır. Yassılık indeksi Formül 3.12 yardımıyla hesaplanmıştır.

$$Yassılık\ indeks = \frac{A}{B} \times 100 \quad (3.12)$$

Burada;

A: Şablondan geçen agreganın ağırlığı, gr

B: Deneyde kullanılan agreganın ağırlığı, gr

### 3.2.1.6. Soyulma deneyi

Soyulma deneyinde TS EN 12697-11 standardı esas olarak alınmıştır. Bu deneyin amacı, agreganın soyulma oranının belirlenmesidir. Soyulma dayanımı agrega ile bağlayıcı madde olan bitüm arasındaki aderans bağının bir göstergesidir. Deney numuneleri 9.5-4.75mm elek aralığında değişen 200gr agrega malzemesinden oluşur. Numuneler yıkanır ve 110 derecelik etüvde kurutulur. Bu deneyin yapılışı aşağıda özetlenmiştir;

- 50 gr agrega beher içine konulur. 150 derece sıcaklığa sahip etüvde 1 saat bekletilir.
- 2.5 gr bitüm 250 cm<sup>3</sup>lük beher içerisine eklenir. Kum banyosuna içinde bitüm olan beher konulur. Agregalar kum banyosundaki beher içerisine eklenir ve agrega yüzeylerinin tamamı bitüm ile kaplanıncaya kadar karışım sıcak cam baget ile karıştırılır. Beher 60 °C'lik etüv içerisinde 24 saat boyunca bekletilir.
- 24 saat sonra beher içerisindeki karışım petri kaplarına aktarılır. Petri kaplarının içerisine karışımın üzerine çıkacak kadar saf su eklenir ve petri kaplarının kapakları kapatılır. Petri kapları 60 °C'lik etüv içerisinde 24 saat boyunca bekletilir.
- Son olarak etüvden çıkartılan petri kaplarının içerisindeki su boşaltılır ve petri kapları tekrar saf su ile doldurulur. Petri kaplarına yandan ışık verilerek agrega yüzeyleri incelenir ve soyulma oranı belirlenir.



Şekil 3.6. Soyulma deneyi, petri kabındaki numuneler

### 3.2.1.7. Metilen mavisi deneyi

Metilen Mavisi Deneyi TS EN 933-10 standardına uygun olarak yapılmıştır. Bu deney, agregata karışımı içerisindeki kil ve silt miktarını belirlemek amacı ile yapılmaktadır. Agregata karışımında bulunan kil ve silt: deney sırasında kullanılan metilen mavisi (MM) ile tepkimeye girmektedir. Kil ve silt, metilen mavisini absorbe eden bir malzemedir. Karışımındaki kil ve silt miktarı verilen sınır değerlerine göre fazla ise MM değeri yüksek çıkmaktadır. Karıştırıcı 600 devir/dk'ya ayarlanıp, toz haldeki metilen mavisi suya ilave edilerek 45 dakika karıştırılır. 2 mm açıklıklı elekten geçen 200 gr agregata, terazi yardımıyla hazırlanıp bir kaba alınır. 200 gr agregata 500 ml su ilave edilir. Metilen mavisi çözeltisinin kullanım süresi 28 gündür. Renk kıyaslaması için 45 dk karıştırılan agregata-su karışımından filtre kağıdına cam baget yardımıyla bir damla damlatılır. Karıştırıcı 400 devir/dk'ya ayarlanır ve karışıma 5ml metilen mavisi ilave edilerek 1 dk boyunca karıştırmaya devam edilir. 1 dakika sonunda filtre kağıda çözeltiden bir damla damlatılır. Karıştırıcı 400 devir/dk'ya ayarlanır ve 5ml metilen mavisi daha ilave edilir. 1 dk sonunda filtre kağıdına bir damla daha damlatır. Filtre kağıdında hale görülünceye ve bu hale kalıcı oluncaya kadar bu işlemler tekrarlanır ve deney sonunda 3.13 deki formül kullanılarak metilen mavisi değeri yüzdesi olarak hesaplanır. Harçta kullanılan agregaların elek çapı ve geçen yüzdelere Çizelge 3.1'de gösterilmiştir.

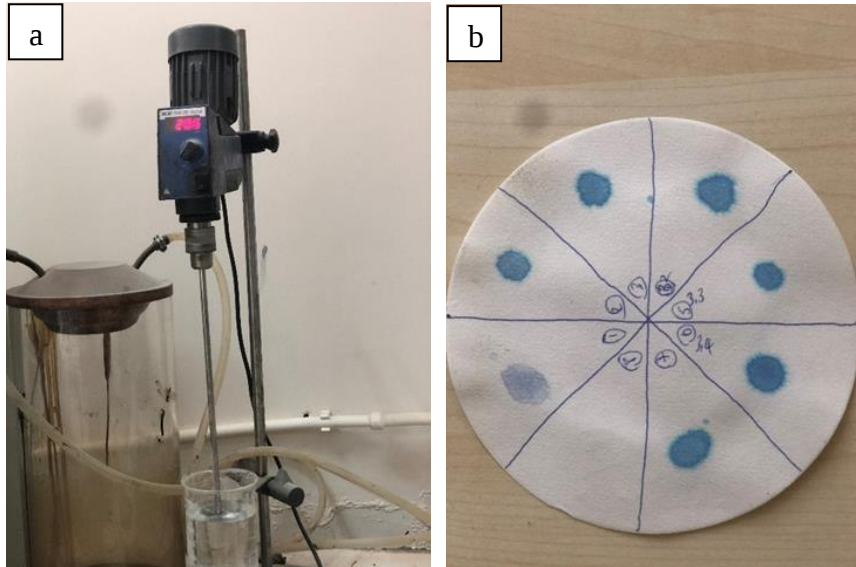
$$MM = \frac{V_1}{M_1} \times 100 \quad (3.13)$$

Burada;

MM: Metilen mavisi değeri (%)

$V_1$ : Kullanılan agreganın ağırlığı, gr

$M_1$ : Kullanılan metilen mavisi çözeltisinin hacmi, ml



**Şekil 3.7.** Metilen mavisi deneyi; **a)** Metilen mavisi çözeltisi hazırlanması; **b)** Filtre kağıdında hale oluşumunun gözlenmesi

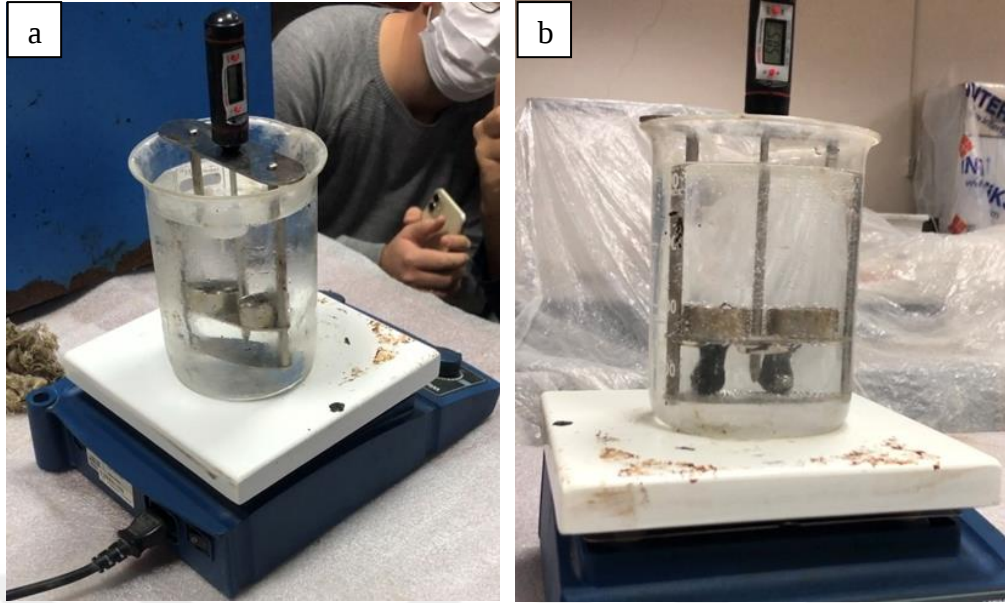
### 3.2.2. Bitüm deneyleri

#### 3.2.2.1. Penetrasyon deneyi

Penetrasyon deneyi TS EN 1426 standartına göre yapılmıştır. Deney prosedürü şu şekildedir; bitüm dökülecek kıvama gelinceye kadar ısıtılır, iyice karıştırılır ve test kaplarına dökülür. Kaptaki bitümün kalınlığı, beklenen penetrasyondan en az 15 mm daha fazla olmalıdır. Numune kapları, bir saat süreyle 25°C sıcaklıkta su banyosunda bekletilir. Bir saat sonunda numune su banyosundan çıkarılır ve penetrasyon cihazının altına yerleştirilir. Penetrasyon iğnesi bitüm numunesinin yüzeyi ile çok az bir şekilde temas ettirilir. Bundan sonra iğne yük uygulanmış bir şekilde serbest bırakılır ve 5 saniye iğnenin bitüm içerisine girmesine izin verilir. Bu halde son okuma kaydedilir. Bu numune üzerinde en az 10 mm mesafelerde üç kez deney tekrarlanır. Her testten sonra iğne çıkartılmalı, benzinle silinmeli ve kurutulmalıdır. Raporlanan üç ölçümün ortalaması penetrasyon değeridir.

#### 3.2.2.2. Yumuşama noktası deneyi

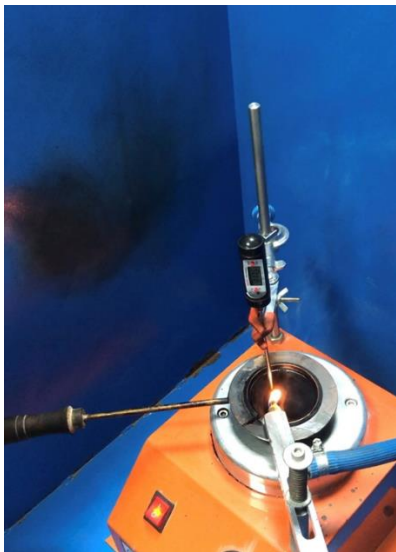
Bu deney TS EN 1427 standartına göre yapılmıştır. Deney prosedürü şu şekildedir; Bitüm tahmin edilen yumuşama noktasının 75 °C – 100 °C üzerinde bir sıcaklığa kadar ısıtılır. Bitüm akışkan, hava kabarcıkları ve sudan arındırılınca kadar karıştırılır. Daha sonra metal bir plaka üzerine, halkalar yerleştirilir. Bu metal plaka vazelin ile kaplanır. Halkaların içerisine bitüm dökülür ve oda sıcaklığında 30 dakika soğutulur. Sıcak, keskin bir bıçakla fazla bitüm sıyırılır ve halkadaki malzeme düzeltilir. Deney aparatı, halkalar, termometre ve bitümün üzerine demir bilye yerleştirilerek Şekil 3.8.a’da görüldüğü gibi beherin içerisine yerleştirilir. Beherin içerisine 5 °C sıcaklığındaki su eklenir ve beher manyetik ısıtıcının üzerine konulur. Behere ısı uygulanır ve suyun sıcaklığı dakikada  $5 \pm 0.5$  °C üniform bir oranda yükselmesi için ısıtılır. Sıcaklık arttıkça, bitüm yumuşar ve demir bilye, bitümün bir kısmını da beraberinde taşıyarak halkanın alt yüzeyinden çıkar. Demir bilyelerin herhangi biri beherin alt yüzeyine temas ettiğinde sıcaklık termometreden okunur ve not edilir. İkinci bilye de beherin alt yüzeyine değdiğinde sıcaklık kaydedilir. Ardından, iki okumanın ortalamasını hesaplanır. Bu yumuşama noktası değeridir.



**Şekil 3.8.** Yumuşama noktası deneyi; **a)** Bitümün akmadan önceki hali; **b)** Bitümün aktıktan sonraki hali

### 3.2.2.3. Parlama noktası deneyi

Parlama noktası testi TS EN ISO 2592 standardına göre yapılmıştır. Bu test, üretim uygulamaları sırasında bitüm ısıtılırken oluşabilecek tutuşma ve alevlenme riskini önlemek için uygulanmaktadır. Bir alevle temas ettiğinde bitümün parladığı fakat bitümün yanmaya devam etmediği sıcaklığı bulmak için yapılan bir testtir. Deneyde kullanılan bitüm uygun bir viskoziteye ulaşana kadar yani 150 – 170 °C'ye kadar ısıtılır. Isıtılan bitüm metal kapta bulunan işaretli yere kadar eklenir ve deney numunesi hazırlanır. Sıcaklık kontrolü bir şekilde artırılarak, belirli bir sıcaklık değerinden sonra numunenin üzerinden alev geçirilmiştir ve böylece bitümün parladığı sıcaklık değeri belirlenmiştir.



**Şekil 3.9.** Parlama noktası deneyi

### 3.2.2.4. Düktilite deneyi

Düktilite deneyi, ASTM D 113 standartına göre yapılmıştır. Bu deneyin amacı bitümün yavaş etkiyen yükler altında uzama kabiliyetini belirlemektir. Bu deney ile standartlara uygun olarak hazırlanmış numenin kopmadan uzayabileceği miktar cm cinsinden tespit edilir. Bu deneyde, bitüm sıcaklığı 90 °C üstünü geçmeyecek şekilde ısıtılmış ve düktilite kalıplarına dökülmüştür. 3 adet numune hazırlanmıştır. Numuneler soğumaları için oda sıcaklığında 30 dakika bekletilmiştir. Su banyosuna koyulan numuneler delikli uçlarından düktilite cihazına yerleştirilmiş ve cihaz çalıştırılmıştır. Numuneler kopuncaya kadar çekme işlemine devam edilmiştir. Düktilite cihazı 5 cm/dakika hızla çalıştırılmıştır.



Şekil 3.10. Düktilite deneyi, bitümün koptuğu an

### 3.2.2.5. İnce film halinde ısıtma kaybı deneyi (TFOT)

Bu deney ile bitümlü sıcak kaplamaların üretilmesi ve imalatı sırasında meydana çıkan yüksek sıcaklıklar neticesinde bağlayıcı malzeme olan bitümün ağırlık azalması yani yaşlanması analiz edilmektedir. Bu deney, sıcaklığını  $163 \pm 1^\circ\text{C}$ 'ye otomatik olarak ayarlayabilen, cam kapaklı, numuneleri taşımak için gerekli döner tablaya sahip olan etüvde yapılmıştır. Döner tablanın hızı 5 devir/dk'dır. Deney kabı: 15 cm çapında, 3.5 mm derinliğinde, metalden imal edilmiş, tabanı düz, silindirik bir kaptır. İlk olarak kapların boş ağırlıkları ölçülmüştür. Her numune kabına yaklaşık  $50 \pm 0.5$  gr bitüm numunesi konulmuştur. Bitüm konulan kapların ağırlıkları ölçülmüştür. Numuneler  $163^\circ\text{C}$ 'de 5 saat boyunca etüvde bekletilmiştir. Etüvde geçen 5 saatten sonra numuneler dikkatli bir şekilde dışarı çıkarılarak soğuması için oda sıcaklığında bırakılmıştır. Ardından numunelerin son ağırlıkları ölçülüp not edilmiştir. İki adet numunenin deney sonuçlarının aritmetik ortalaması ısıtma kaybı değeri olarak alınmıştır. Bitümlü maddenin ısıtma kaybı değeri aşağıdaki formül yardımıyla hesaplanmıştır.

$$\Delta M = \frac{C - B}{B - A} \times 100 \quad (3.14)$$

Burada;

$\Delta M$ : Kütle değişimi, %

A: Kabın boş ağırlığı, gr

B: Kabın ve bitümün deneyden önceki ağırlığı, gr

C: Kabın ve bitümün deneyden sonraki ağırlığı, gr



Şekil 3.11. TFOT cihazı

### 3.2.3. Çimento harcının hazırlanması

Bu tez çalışmasında çimento harcının üretilmesinde ilk olarak PÇ 52.5 N beyaz çimento kullanılmıştır. Bu çimento ile oluşturulan harcın basınç ve eğilme dayanımlarının istenilen değerlerin çok üzerinde çıktığı görülmüştür yani oldukça rijit harç elde edilmiştir. Eğer harç çok rijit olursa porozla iyi aderans sağlamayacağı ve dolayısıyla ayrışmalar ve kırıklar meydana geleceğe düşünülmüştür. Saboo vd. (2019) yaptıkları deneysel çalışmada YRK'nin basınç dayanımının 7 gün için 25 MPa değerinden fazla olması durumunda, YRK da kırıklar meydana geleceğini tespit etmişlerdir. Tez çalışmasında beyaz çimento ile hazırlanan çimento harcının basınç değeri 36.68 Mpa dan yüksek çıktığı için beyaz çimentolu harç tasarımı uygun görülmemiştir.

İkinci aşamada yukarıda açıklanan sebeplerden dolayı harç dizaynında CEM I 42.5 R tipi çimento kullanılmasına karar verilmiştir. Harç kontrol numunesi ve katkı numuneler olarak iki tipte dizayn edilmiştir. Kontrol numunesinde agrega, çimento, su ve süperakışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Katkılı harç numunelerinde ise yüksek fırın cürufu ve metakaolin olmak üzere iki farklı katkı maddesi harca eklenmiştir. Yüksek fırın cürufu harçta çimentoya ikame olarak %5, %10, %15, %20, %25, %30, %40 ve %50 oranlarında cüruf kullanılmıştır ve %0.4-%0.8 oranları arasında süper akışkanlaştırıcı ilave edilmiştir. Bu tasarımda %0.6 ve üzerindeki oranlarda süper akışkanlaştırıcı kullanılmasının segregasyona sebep olduğu deneysel çalışmalarla belirlenmiştir.



**Şekil 3.12.** Harcın segregasyon hali

Metakaolin içerikli harçta ise çimentoya ikame olarak %2.5, %5, %7.5, %10, %12.5, %15, %17.5 ve %20 oranlarında metakaolin kullanılmıştır. Metakaolin içerikli harçta %0.7 oranında süper akışkanlaştırıcı ve %50-55 oranları arasında su-çimento kullanılmıştır.

Harcın hazırlanması için ilk olarak Çizelge 3.9'da (Nazary 2019) gösterilen gradasyona uygun olan agrega ve çimento, mikserde kuru olarak 1 dakika karıştırılır. Daha sonra belli bir miktarda su ilave edilerek akışkanlaştırıcı eklenir ve karıştırma işlemi mikserde tamamlanır. Şekil 3.13'te gösterilen ve tasarım için hazırlanan harç basınç, eğilme ve büzülme kalıplarına dökülüp 1 gün bekletilmiştir. Daha sonra numuneler kalıptan çıkarılmış ve 3, 7, 28, 56 ve 90 günlük basınç, eğilme ve büzülme deneylerinin yapılması için numuneler su dolu kür havuzunda bekletilmiştir. Bu çalışmada 16 farklı oranlarda dizayn edilen harçlar hazırlanmıştır ve bunların içerisinde optimum şartları sağlayan dizayn seçilmiştir.

**Çizelge 3.9.** Kullanılan ince agreganın elek analizi

| Elek çapı (mm) | Elekten geçen (%) |
|----------------|-------------------|
| 0.6            | 100               |
| 0.425          | 99.6              |
| 0.18           | 34.2              |
| 0.075          | 1.15              |

**Şekil 3.13.** Hazırlanan çimento harçlarına ilişkin numuneler

### 3.2.4. Harç deneyleri

#### 3.2.4.1. Akışkanlık deneyi

Bu deneyde harcın akışkanlık süresi tayin edilmektedir. Harcın akışkanlığı ASTM C939-10 standardına göre belirlenmiştir. Bu deneyde, harcın akışkanlık süresi 10-14 saniye arasında olması gerekmektedir (Saboo vd. 2019). Akış süresi harcın poroz içerisine girebilmesi için önemli bir kriterdir. Eğer bu aralığın dışında akış süresi bulunursa yani bu süre 14 saniyenin üzerinde olursa harç poroz asfaltın içerisine giremez. Başka bir ifadeyle bu akış süresinde poroz asfalt boşlukları harç ile tamamen dolmaz. Akışkanlık deneyinde hazırlanan harç alt çıkışı kapalı olan huniye dökülmüştür. Huni içerisindeki harcın huniden çıkış süresi kronometre yardımıyla ölçülmüştür. Deneyde kullanılan akışkanlık hunisi Şekil 3.14’te gösterilmiştir.



**Şekil 3.14.** Kullanılan akışkanlık hunisi

#### 3.2.4.2. Terleme deneyi

Bu deney ASTM C 940 standartına göre taze harca uygulanmıştır. Bu deneyin amacı taze harcın içerisindeki suyun harç yüzeyine çıkma eğiliminin belirlenmesidir. ASTM C 940 standartta göre 200 ml hazırlanan taze harç Şekil 3.15'teki dereceli behere dökülmüştür. Dereceli beherin üstü streç ile sarılmıştır ve harç 2 saat beherin içerisinde bekletilmiştir. 2 saatten sonra harçtan ayrılan suyun hacmi ölçülmüştür.

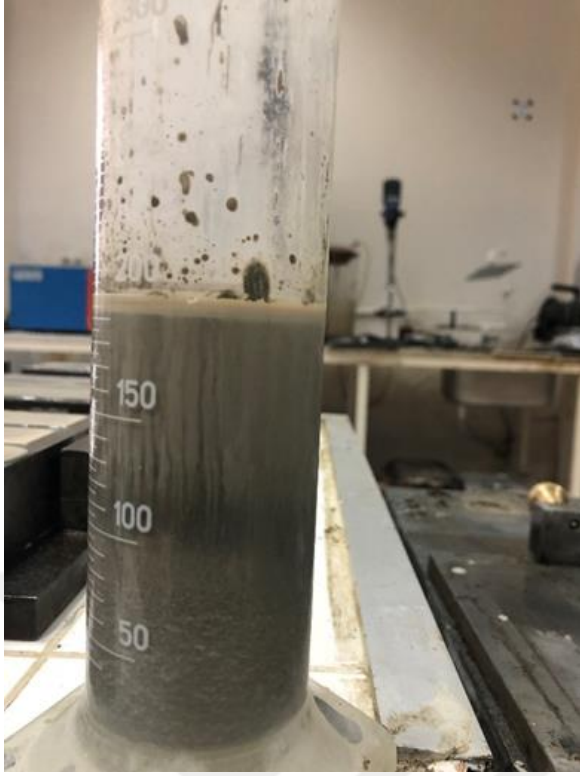
$$T = \frac{V_w}{V_1} \times 100 \quad (3.15)$$

Burada;

$T$ : Terleme, %

$V_1$ : Harcın numunenin toplam hacmi, ml

$V_w$ : Harcın üstüne ayrılan suyun hacmi, ml



**Şekil 3.15.** Terleme yüzdesinin bulunması

#### 3.2.4.3. Eğilme dayanımı deneyi

Bu deneyde her harç dizaynından, farklı günlerdeki eğilme dayanımlarının bulunması için üçer numune hazırlanmıştır. 1, 3, 7, 28, 56 ve 90 günlük eğilme dayanımları kontrol edilmiştir ve toplam 144 adet numune oluşturulmuştur ve test edilmiştir. 144 numune arasında eğilme dayanımı değeri açısından en iyi değeri sahip numunelerin seçilmesi hedeflenmiştir. Bu deney ASTM C348-18 standartına göre, üç noktalı yükleme yöntemi ile yapılmıştır. Numunelerin boyutları 40×40×160 mm'dir. Numuneler 100 mm açıklıklı iki mesnet üzerine yerleştirilmiştir. Numuneler tam ortasından saniyede 44 N sabit yük altında kırılmış ve eğilme dayanımı sonuçları belirlenmiştir.

Eğilme dayanımı, MPa olarak Denklem 3.16 yardımıyla hesaplanmıştır.

$$F = 1.5 \times \frac{PL}{b^3} \quad (3.16)$$

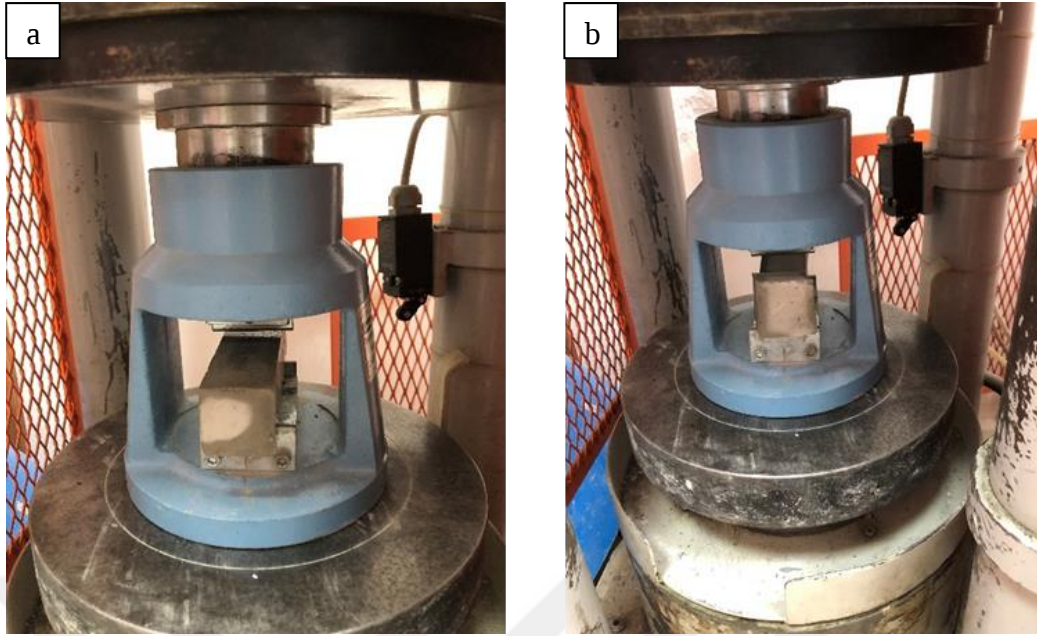
Burada;

$F$ : Eğilme dayanımı, MPa

$B$ : Numunenin kenar uzunluğu, mm

$P$ : Numunenin kırıldığı anda numunenin ortasına uygulanan en büyük düşey kuvvet, N

$L$ : Test aparatının numunenin alt yüzeyine temas ettiği noktalar arası mesafe, mm



**Şekil 3.16.** Eğilme dayanımı deneyi; **a)** Numune kırılmadan önce; **b)** Numune kırılmadan sonra

#### 3.2.4.4. Basınç dayanımı deneyi

Bu deney BS EN 196-1 standartına göre yapılmıştır. Hazırlanan numuneler 200 ton basınç yükü kapasiteli beton pres makinesinde kırılarak basınç dayanımı değerleri elde edilmiştir. Basınç dayanımı deneyi 1, 3, 7, 28, 56 ve 90 gün boyunca kürlenmiş numuneler üzerinde yapılmıştır. Numunelerin boyutu 50×50×50 mm'dir. Tez kapsamında 8 farklı karışım hazırlanmış olup toplam 144 numune deneye tabi tutulmuştur. Basınç dayanımı en yüksek dayanımlı numuneler araştırılmıştır.

Basınç dayanımı  $F_m$ , eşitlik (3.17) yardımıyla hesaplanmaktadır:

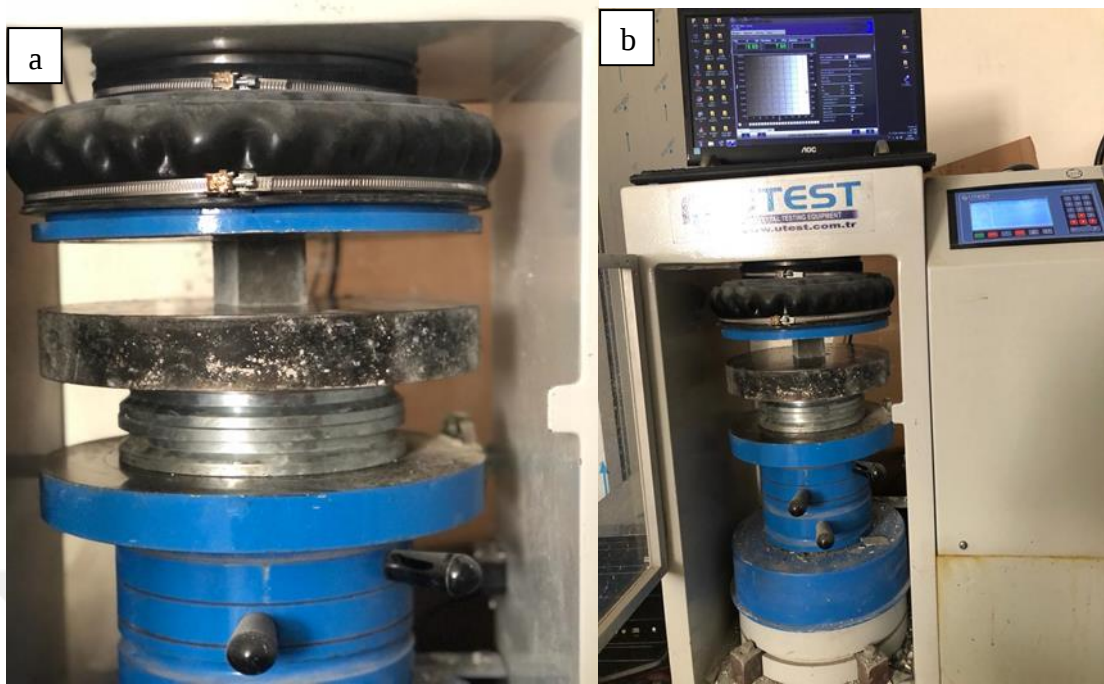
$$F_m = \frac{P}{A} \quad (3.17)$$

Burada,

$F_m$ : Basınç dayanımı (N/mm<sup>2</sup>)

$P$  : Kırılma yükü (N)

$A$  : Yüklemenin yapıldığı kesit alanı (mm<sup>2</sup>)



**Şekil 3.17.** Basınç dayanımı deneyi; **a)** Numune kırılmadan önce, **b)** Numune kırılmadan sonra

#### 3.2.4.5. Büzülme deneyi

Büzülme deneyinde 8 tane metakaolinli ve 8 tane yüksek fırın cürufllu numune hazırlanmıştır. Her karışım için ikişer numunenin boy değişimi 1, 3, 7, 14, 21, 28, 56 ve 90. günlerde takip edilmiştir. Büzülme numunelerinin boyutları 40×40×160 mm'dir. Kalıptan çıkartılan çimento harcı örnekleri ilk olarak 48 saat boyunca su içerisinde kürlendirilmiştir. Sudan çıkartılan örnekler 90 gün boyunca laboratuvar ortamında bekletilmiş ve düzenli olarak Şekil 3.18'de gösterilen dijital ölçüm cihazı ile numunelerin uzunluk değişimleri kaydedilmiştir. Bu deneyde ASTM C596-09 standardı kullanılmıştır.

Çimento harçlarının büzülme değerleri, Denklem 3.18 ile bulunmuştur:

$$B = \frac{L_0 - L_f}{160} \times 100 \quad (3.18)$$

$B$  = Büzülme (%),

$L_0$  = kurumadan önceki boyu (mm)

$L_f$  = kurama esnasında gösterdiği boy (mm)



**Şekil 3.18.** Büzülme deneyi

### 3.2.5. Yarı rijit kaplamanın hazırlanması

Bu çalışmada YRK'nin hazırlanması için Guluyev (2022)'in çalışmasında hazırlanan poroz asfalt dizaynı kullanılmıştır. Bu poroz asfaltın gradasyonu Çizelge 3.10'da, gradasyon eğrisi Şekil 3.19'da ve poroz asfaltın özellikleri Çizelge 3.11'de verilmiştir. Poroz asfaltın hazırlanması için agregalar 160 °C kadar laboratuvar tipi etüvde ısıtılmıştır. Isınan agregaların üzerine fiber eklenmiştir. Daha sonra agrega ve fiber karışımının üzerine bitüm eklenmiştir. Poroz asfalt homojen hale gelene kadar etüvde karıştırılmıştır. Homojen hale gelen poroz asfalt karışımı 2000×600 mm boyutundaki dikdörtgen kalıba dökülmüştür. Dökülen porozun sıcaklığının 100 santigrat dereceye kadar inmesi beklenmiştir ve dökülen BSK el silindiri ile sıkıştırılmıştır. Sıkıştırma işleminden sonra poroz asfaltın kalınlığı 5 cm olmuştur. Poroz asfaltın soğuması için, poroz asfalt 1 gün boyunca laboratuvarında bekletilmiştir. Poroz asfaltın içerisine dizayn edilmiş çimento harçları dökülmüştür. Çimento harcının priz alması için YRK 24 saat bekletilmiştir. 24 saat sürenin sonunda YRK'nin kürleme işlemi için ıslatılmış jüt bezi kullanılmıştır. 3, 7, 28, 56 ve 90 günlük sürelerde performans testlerinin yapılabilmesi için YRK'den karot numuneleri alınmıştır. Karot numuneleri ile üzerinde yapılan deneyler Çizelge 3.12'de gösterilmiştir.

**Çizelge 3.10.** Poroz asfaltın gradasyonu (Guluyev 2022)

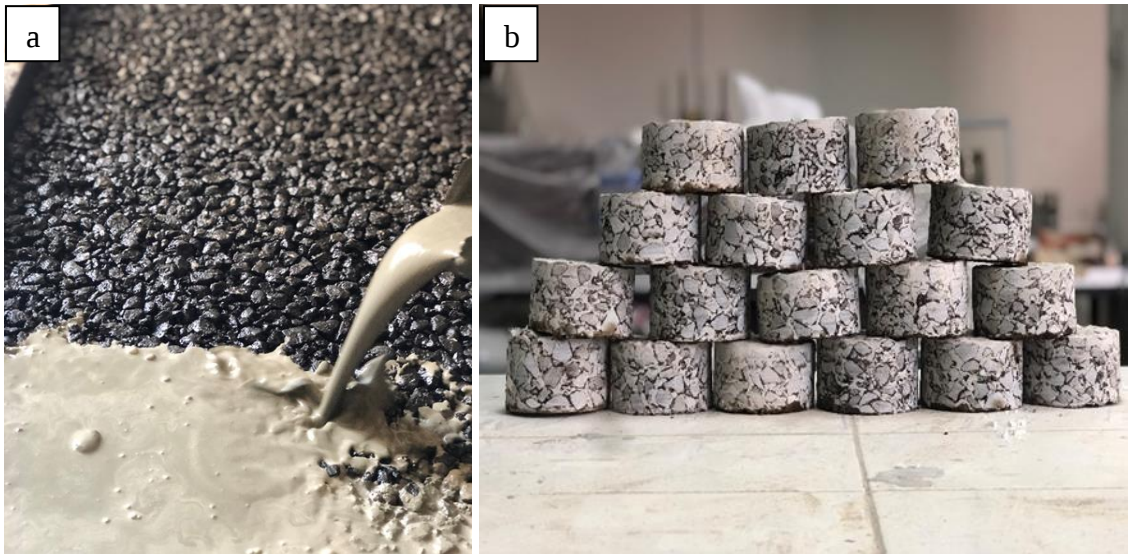
|            |       |      |     |     |      |      |      |     |      |      |     |
|------------|-------|------|-----|-----|------|------|------|-----|------|------|-----|
| Elekler mm | 0.075 | 0.15 | 0.3 | 0.6 | 1.18 | 2.36 | 4.75 | 9.5 | 13.2 | 16   | 19  |
| Geçen %    | 2     | 2.5  | 3   | 3.5 | 4.5  | 5    | 7    | 7.5 | 36   | 67.5 | 100 |

**Şekil 3.19.** Poroz asfaltın gradasyon eğrisi (Guluyev 2022)**Çizelge 3.11.** Poroz asfaltın özellikleri (Guluyev 2022)

| Özellik                 | Değeri            |
|-------------------------|-------------------|
| Bitüm oranı, %          | 4                 |
| Fiber oranı, %          | 0.3               |
| Boşluk oranı, %         | 29.02             |
| Bitüm süzülmesi, %      | 0                 |
| Sıkıştırma vuruş sayısı | Tek yüze 50 vuruş |



Şekil 3.20. YRK üretim aşamaları



Şekil 3.21. Harcın poroza yerleştirilmesi ve karot numunelerinin elde edilmesi

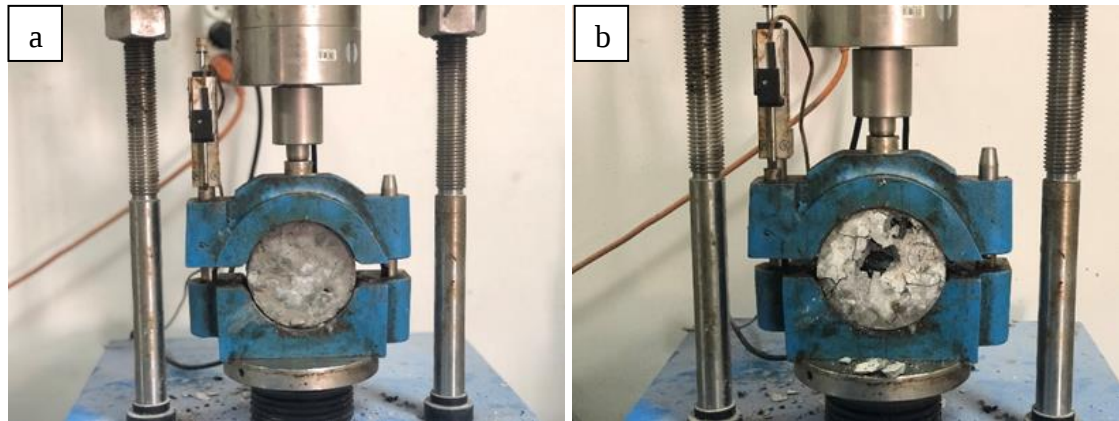
**Çizelge 3.12.** YRK deneyleri

| Yapılan deneyler                  | Standart            |
|-----------------------------------|---------------------|
| Marshall Stabilite ve Akma Deneyi | ASTM D6927 -06      |
| Nem Hasarına Karşı Direnç Deneyi  | ASTM D6931 -17      |
| Basınç Dayanım Deneyi             | ASTM C39 /C39M - 18 |
| Donma Çözülme Deneyi              | ASTM C 666          |
| Permeabilite Deneyi               | TS EN 12697-19      |
| Cantabro deneyi                   | ASTM C348- 18       |
| Yüzey pürüzlülüğü deneyi          | ASTM E303-93        |

### 3.2.6. Yarı rijit kaplama deneyleri

#### 3.2.6.1. Marshall stabilite ve akma deneyi

Bu deney, YRK'nin dayanımını ve esnekliğinin belirlenmesi için yapılmaktadır. Marshall stabilite ve akma deneyi ASTM 6927 standartına göre yapılmıştır. Bu çalışmada YRK'den alınan karot numuneleri 60 santigrat derecelik su banyosunda 40 dakika bekletilmiştir. Su banyosundan çıkartılan karot numuneleri 50 mm/dk sabit hız altında tam otomatik Marshall stabilite makinesinde kırılmıştır. Deney sonucunda YRK numunelerin stabilite ve akma değerleri bulunmuştur. Bu deney 1, 3, 7 ve 28 gün boyunca kürlenene numunelere uygulanmıştır. Her kürlenme günü için ikişer numune alınmıştır. Toplam 24 adet YRK numunesine bu deney prosedürü uygulanmıştır.



**Şekil 3.22.** Marshall stabilite ve akma deneyi ; a) Yük uygulanmadan önce; b) Yük uygulandıktan sonra

### 3.2.6.2. Nem hasarına karşı direnç deneyi

Bu deney YRK'nin nem hasarına karşı mukavemetini belirlemek için yapılmaktadır. Deney, AASHTO T 283 standartına göre yapılmıştır. Nem hasarına karşı direnç deneyinde iki grup numune kullanılmıştır. Bu gruplardan ilki koşullandırılmış diğeri ise koşullandırılmamış numunelerden oluşmaktadır. Numuneleri koşullandırmak için uygulanan prosedür şu şekildedir;

Koşullandırılmış YRK numunelerinin boşlukları vakumlu desikatörde %70-80 oranında suya doyurulmuştur. Vakumlu desikatörden çıkartılan numuneler streç filmle kaplanmış ve poşete konmuştur. Poşetin içerisine 10 ml su eklenmiştir. Daha sonra numuneler derin dondurucuda 16 saat boyunca -18 santigrat derecede bekletilmiştir. Derin dondurucudan çıkartılan numuneler 24 saat boyunca 60 santigrat derecelik su banyosunda bekletilmiştir. Su banyosundan çıkartılan numuneler 25 santigrat derecelik su banyosunda 2 saat daha bekletilmiştir. Son olarak numuneler Marshall stabilite cihazında indirekt çekme başlığı kullanılarak 50 mm/dk sabit hızla eksenel olarak kırılmıştır. Koşullandırılmamış numuneler ise 2 saat 25 santigrat derecelik su banyosunda bekletildikten sonra Marshall stabilite cihazında indirekt çekme başlığı kullanılarak 50 mm/dk sabit hızla eksenel olarak kırılmıştır. Son olarak koşullandırılmış ve koşullandırılmamış numunelerin indirekt çekme değerleri birbirine oranlanarak indirekt çekme mukavemeti oranları bulunmuştur. Nem hasarına karşı direnç deneyi formülleri aşağıda görülmektedir.

$$ITS = \frac{2F}{\pi h d} \quad (3.19)$$

Burada,

*ITS*: İndirekt çekme değeri, kpa

*F*: Yük, kN

*h*: Numunenin yüksekliği, mm

*d*: Numunenin çapı, mm

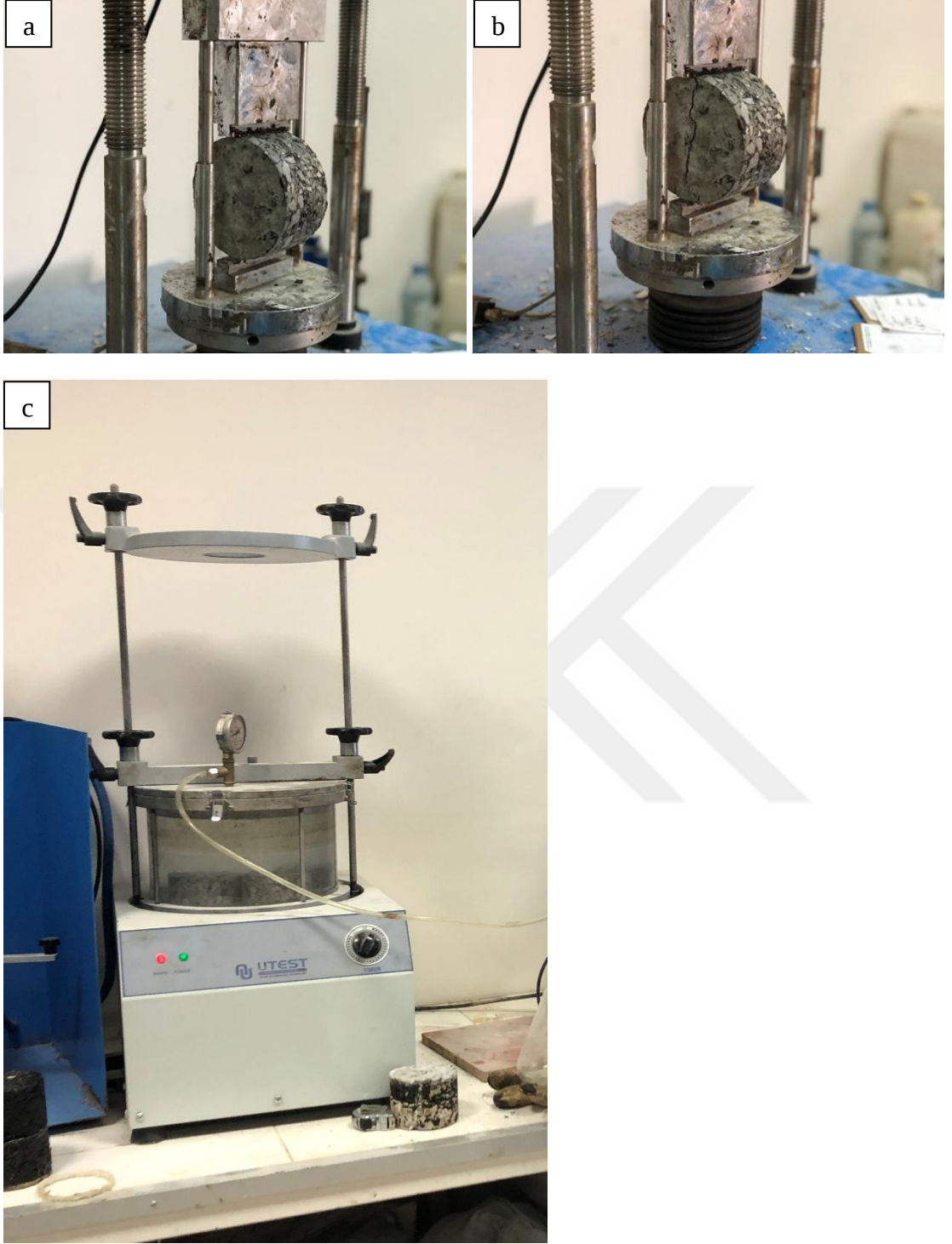
$$TSR = \frac{ITS_{koşullu}}{ITS_{koşulsuz}} \quad (3.20)$$

Burada;

*TSR*: İndirekt çekme değeri oranı, %

*ITS<sub>koşullu</sub>*: Koşullu numunelerin indirekt çekme değeri, kpa

*ITS<sub>koşulsuz</sub>*: Koşulsuz numunelerinin indirekt çekme değeri, kpa



**Şekil 3.23.** Nem hasarına karşı direnç deneyi; **a)** Yük uygulanmadan önce; **b)** Yük uygulandıktan sonra; **c)** Vakumlu desikatörde numunenin su ile doyurulması

### 3.2.6.3. Basınç dayanımı

Bu deney YRK'nin basınca karşı dayanımının belirlenmesi amacı ile yapılmıştır. Bu deney ASTM C39 standartına göre yapılmıştır. Karot numunelerine gerekli durumlarda üst yüzeyi alçı ile düzlenerek başlıklama işlemi yapılmıştır. Bu deney 200 ton kapasiteli hidrolik beton preste yapılmıştır. Deneyde kullanılan eksenel hız 0.25 MPa/sn'dir. Bu deneyde numunelerin 1, 3, 7 ve 28 günlük basınç dayanımı değerleri bulunmuştur.

$$P = \frac{F}{A} \quad (3.21)$$

Burada;

$P$ : Basınç dayanımı, MPa

$F$ : Maksimum kırılma yükü, N

$A$ : Numune yüzey alanı, mm<sup>2</sup>



**Şekil 3.24.** Basınç dayanımı deneyi; **a)** Yük uygulanmadan önce; **b)** Yük uygulandıktan sonra

#### 3.2.6.4. Donma çözülme deneyi

Kaplamanın sıcak ve soğuk hava şartlarındaki performansını inceleyen donma çözünme deneyi ASTM C 666 standardına göre yapılmıştır. Numuneler -16°C’de 18 saat ve daha sonra 6 saat 25°C’de bekletilerek bir döngüye tabi tutulmuştur. 3 ve 5 döngü olmak üzere iki grup numune hazırlanmıştır. Döngüler sonunda numuneler indirekt çekme başlığında kırılmıştır.

$$ITS = \frac{2P_{max}}{\pi td} \quad (3.22)$$

Burada;

*ITS*: İndirekt çekme mukavemeti, kpa

*P<sub>max</sub>*: Numuneye uygulanan maksimum yük, kN

*t*: YRK numunesinin yüksekliği, mm

*d*: YRK numunelerin çapı, mm



Şekil 3.25. Donma çözülme deneyi numuneleri

### 3.2.6.5. Permeabilite deneyi

Permeabilite deneyi ile, YRK’de dönme-çözülme sonrası harç ile poroz asfalt arasında kılcal boşlukların oluşup oluşmadığı araştırılmıştır. Bu deney; yatay permeabilite ve düşey permeabilite olarak iki şekilde yapılmıştır.

#### Düşey permeabilite

Bu deneyde plastikten oluşan membran büyük borunun içine yerleştirilmiştir ve alınan karot numunesi membranlı borunun içine konulmuştur. Numunenin yanlarından su geçmemesi için membrana 50 kPa hava basılmıştır. Numunenin üzerinden 10 dakika musluktan su bırakılmıştır. Bu sürenin sonunda en az 60 saniye olacak şekilde numunenin içinden geçen su bir kapta toplanmıştır. Bu deneyde en başta numunenin debisi aşağıdaki denklem (3.23) yardımıyla hesaplanmıştır.

$$Q_v = \frac{m}{t} \times 100^{-6} \quad (3.23)$$

Burada;

$Q_v$ : Suyundan düşey hacimsel debisi, m<sup>3</sup>/sn

$m$ : Tepsiye akan suyun ağırlığı, gr

$t$ : Tepsiye akan suyun süresi, sn

Numunenin hacimsel debisi hesapladıktan sonra, ona bağlı olarak permeabilite deneyi yapılarak düşey permeabilite değeri aşağıdaki formül kullanılarak hesaplanmıştır.

$$K_v = \frac{4Q_v l}{h \pi D^2} \quad (3.24)$$

Burada;

$K_v$ : Düşey permeabilite, m/sn

$l$ : Numunenin yüksekliği, m

$h$ : Suyun yüksekliği, m

$D$ : Numunenin çapı, m



**Şekil 3.26.** Düşey permeabilite deneyi

#### **Yatay permeabilite deneyi**

Bu deneyde en başta numunenin alt kısmı balmumu ile kaplanmıştır. Sonra üst yüzeyinden alüminyum halka, silikon ile yerleştirilmiştir. Silikonun soğuması için beklenmiştir. Numune destek plakasının ortasına yerleştirilmiştir. Musluk açılarak suyun 10 dakika boyunca numunenin içerisinde akmasına izin verilmiştir. Ondan sonra en az 60 saniye hazneden taşan su boş bir kaptan toplanmış ve kabın ağırlığı ölçülmüştür.

Numunenin debisi hesaplandıktan sonra ona bağlı olarak yatay permeabilite değeri hesaplanmıştır.

$$Q_h = \frac{m}{t} \times 10^{-6} \quad (3.25)$$

Burada;

$Q_h$ : Suyun yatay akışa ait hacimsel debisi, m<sup>3</sup>/sn

$m$ : Hazneye akan suyun ağırlığı, gr

$t$ : Hazneye su dolmasına izin verilen süre, sn

$$K_v = \frac{Q_{hl}}{(H + P + 0.5l) \times (\pi D l)} \quad (3.26)$$

Burada;

$K_v$ : Yatay permeabilite, m/sn

$l$ : Numunenin yüksekliği, m

$H$ : Üst tüpün alt tüpe olan uzaklığı, m

$P$ : Alt tüpün yüksekliği, m

$(H+P+0.5l)$ : su sütununun gerçek yüksekliği, m

$D$ : Numunenin çapı, m

### 3.2.6.6. Cantabro deneyi (Aşınma testi)

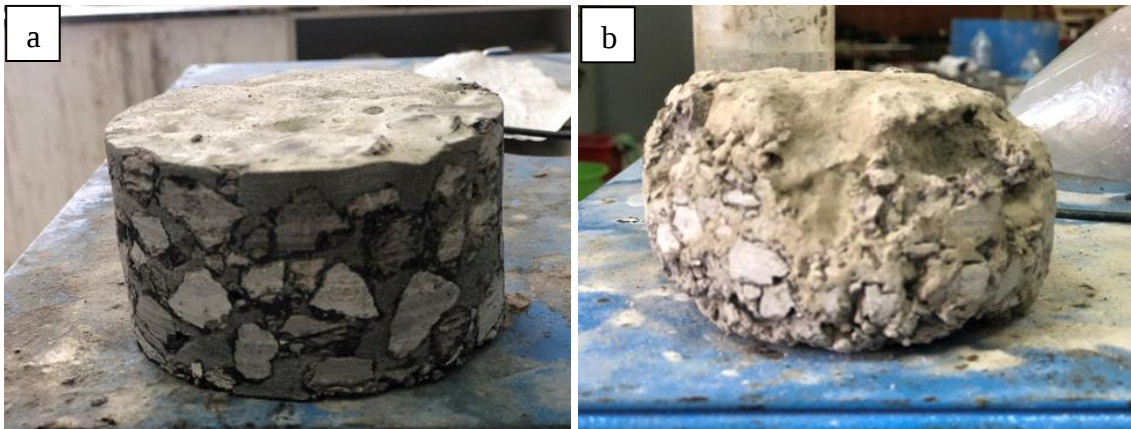
Dayanıklılık, yarı rijit kaplamalar için önemli unsurlardan biridir. Cantabro aşınma testi, karışımın darbeleneceye karşı direncini belirlemek için yapılmıştır. Öncelikle numuneler tartılmış ve daha sonra Los Angeles cihazına yerleştirilmiştir. Cihaz 300 devir/dak hızla çelik bilye eklenmeden çalıştırılmıştır. Cihazdan darbelenmiş olarak çıkarılan numuneler tekrar tartılarak, numunenin ağırlık kaybı % olarak eşitlik 3.27 yardımıyla hesaplanmıştır. Bu değer Cantabro aşınma kaybı olarak not edilmiştir.

$$\text{Cantabro Kaybı} = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100 \quad (3.27)$$

Burada,

$W_1$ : Testten önceki numunenin ağırlığı.

$W_2$ : Testten sonraki numunenin ağırlığı.



**Şekil 3.27.** Cantabro deneyi; **a)** Aşınmadan önce; **b)** Aşındırıldıktan sonra

### 3.2.6.7. Yüzey pürüzlülüğü deneyi

Bir kaplama yüzeyinin kayan araçlara karşı direncinin ölçüsü, patinaj nedeniyle oluşan kuvvetlerle doğrudan ilişkilidir. Yeterli kayma direnci karayolu kazalarının sayısında azalmaya neden olur. Pürüzlü kaplama yüzey dokuları daha iyi sürtünmeyi sağlamaktadır (Asi 2007).

Bu deney ASTM E303-93 standartına göre yapılmıştır. İlk olarak kaplama ve cihazın sürtünme pabucu su ile ıslatılmıştır. Daha sonra cihazın kolu serbest bırakılmış ve cihazdan sürtünme değeri okunmuştur. Bu işlem 5 kere tekrarlanıp ölçüm değerleri not edilmiştir.



Şekil 3.28. Yüzey pürüzlülüğü deneyi

#### 4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Tez çalışmasının bu bölümünde; deneysel çalışmalar boyunca kullanılmış agrega ve bitüme ait performans deneylerinin sonuçları, ayrıca çimento harcına ve yarı rijit kaplamaya uygulanan deneylerin sonuçları ve bu sonuçlar neticesinde elde edilen bulgulardan bahsedilmiştir.

##### 4.1. Agrega Deneylerinin Sonuçları

Los Angeles (aşınma kaybı), donma – çözülme, iri agrega özgül ağırlık ve su emme, ince agrega özgül ağırlık ve su emme, filler özgül ağırlık, soyulma mukavemeti ve metilen mavisi deneylerinin sonuçları ve şartname limitleri Çizelge 4.1’de gösterilmiştir.

**Çizelge 4.1.** Kaba agrega deneylerinin sonuçları

| Deney                                                                            | Şartname sınırı          | Deney standardı                 | Deney sonuçları |
|----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|---------------------------------|-----------------|
| Hava Tesirlerine Karşı Dayanıklılık, (MgSO <sub>4</sub> ile kayıp), %            | ≤16                      | TS EN 1367-2                    | 1.05            |
| Yassılık İndeksi, %                                                              | ≤25                      | BS812                           | 14.5            |
| Soyulma Mukavemeti (Bitüm Kaplı Yüzey), % (24 saat 60 °C suda bekletmeden sonra) | ≥60                      | TS EN 12697-11 (Kısım 403 EK-A) | 92.5            |
| Su Emme, %                                                                       | ≤2.0(WA <sub>242</sub> ) | TS EN 1097-6                    | 0.504           |
| Özgül Ağırlık (gr/cm <sup>3</sup> )                                              | -                        | TS EN 1900-1                    | 2.635           |

**Çizelge 4.2.** İnce agrega deneylerinin sonuçları

| Deney                               | Şartname sınırı           | Deney standardı         | Deney sonuçları |
|-------------------------------------|---------------------------|-------------------------|-----------------|
| Organik Madde, %                    | Negatif                   | TS EN 1744-1 Madde 15.1 | Negatif         |
| Su Emme, %                          | ≤2.0 (WA <sub>242</sub> ) | TS EN 1097-6            | 0.567           |
| Metilen Mavisi, g/kg                | ≤3                        | TS EN 933-9             | 0.75            |
| Özgül Ağırlık (gr/cm <sup>3</sup> ) | -                         | TS EN 1900-1            | 2.821           |

Çizelge 4.1 de görüldüğü gibi yapılan agrega deneylerinin sonuçları ilgili şartnamelere uygun bulunmuştur.

#### 4.2. Bitüm Deneylerinin Sonuçları

Deneyisel çalışmalarda kullanılan bitüme uygulanan penetrasyon, yumuşama noktası, duktilite, parlama noktası ve TFOT deneylerinin sonuçları Çizelge 4.3'te gösterilmiştir.

**Çizelge 4.3.** Bitüm deneylerin sonuçları

| Sıra No | Özellikler                                            | Deney metodu   | Şartname limitleri | Sonuçlar |
|---------|-------------------------------------------------------|----------------|--------------------|----------|
| 1       | Penetrasyon, 25°C, 0.1mm                              | TS EN 1426     | 50-70              | 66.97    |
| 2       | Yumuşama Noktası, °C                                  | TS EN 1427     | 46-54              | 46.3     |
| 3       | TFOT, İnce film halinde ısıtma deneyi (163°C, 5 saat) | TS EN 12607-2  |                    |          |
| 3.1     | Kütle Değişimi, %                                     |                | 0.5 (maks)         | 0.43     |
| 3.2     | Yumuşama Noktası, °C                                  | TS 120 EN 1427 | 48 (min.)          | 50.3     |
| 3.3     | Kalıcı Penetrasyon, %                                 | TS EN 1426     | 50 (min.)          | 70.26    |
| 3.4     | Yumuşama Nok. Artış, °C                               | TS EN 1427     | 9 (maks)           | 48.95    |
| 4       | Parlama Nok, °C                                       | TS ISO 2592    | 230 (min.)         | 257      |
| 5       | Duktilite, mm                                         | ASTM D113      | ≥100               | ≥100     |

Çizelge 4.3 de görüldüğü gibi yapılan bitüm deneylerinin sonuçları ilgili şartnamelere uygun bulunmuştur.

#### 4.3. Akışkan Çimento Harcının Sonuçları

YRK içerisinde kullanılan çimento harcının belirlenmesinde etkili olan kriterler şunlardır; akış süresinin istenilen aralıkta olması, segregasyonun yaşanmaması, kusmanın oluşmaması, yeterli basınç ve eğilme dayanımına sahip olması, büzülmenin olmaması ve terleme değerinin limit değerler içerisinde olmasıdır. Bu çalışmada akışkan çimento harcı için kullanılan akış süresi aralığı 10-14 saniye arasındadır. Akış süresi aralığı belirlenirken literatürdeki çalışmalardan Zhang vd. (2016) ve Zhong vd. (2020) faydalanılmıştır. Tez çalışması kapsamında ilk yapılan laboratuvar deneylerinde CEM I 52.5 N tip beyaz çimento kullanılmıştır. Bu çimento ile hazırlanan harçların basınç dayanımı değerleri Bölüm 3.2.4.1'de bahsedildiği gibi çok yüksek çıkmış ve çok rijit bir harç elde edilmiştir. CEM I 52.5 N tip çimento ile hazırlanan çimento harçlarının formülasyonu ve performans testlerinin sonuçları Çizelge 4.4'te gösterilmiştir. Ayrıca bu tip çimento ile hazırlanan çimento harcının birim maliyeti yüksek olduğu için, deneyisel çalışmalarda CEM I 52.5 N çimento harcı kullanılmaya devam edilmemiştir. Bu neden ile CEM I 52.5 N tip çimento yerine CEM I 42.5 R çimentonun kullanılması

uygun görülmüştür. Bu çalışmada kontrol numunesi ve iki farklı katkı maddesi içeren çimento harçları performans testlerine tabii tutulmuştur. Buradaki katkı maddeleri yüksek fırın cürufu ve metakaolindir. Yüksek fırın cürufu ve metakaolin katkılı çimento harçları ile her bir katkı için 8 farklı katkı oranına sahip numuneler hazırlanmıştır. Bu sayede optimum içeriğe sahip yüksek fırın cürufu ve metakaolin içerikli harçlar belirlenmiş ve bu harçlar YRK dizaynında kullanılmıştır.

**Çizelge 4.4.** Beyaz çimento deneylerin sonuçları

| Numune | su/çim | Akış. Katkı | Akışkanlık | Basınç (3 günlük) | Eğilme (3 günlük) |
|--------|--------|-------------|------------|-------------------|-------------------|
|        | %      | % (gr)      | sn         | MPa               | MPa               |
| BÇ-1-1 | 50     | 0.8 (12.8)  | 14.67      | 52.60             | 10.08             |
| BÇ-1-2 | 50     | 0.9 (14.4)  | 13.51      | 54.52             | 9.61              |
| BÇ-1-3 | 50     | 1 (16)      | 13.9       | 54.87             | 9.14              |
| BÇ-1-4 | 50     | 1.1 (17.6)  | 12.16      | 51.51             | 9.14              |
| BÇ-2-2 | 55     | 0.7 (11.2)  | 12.21      | 48.44             | 8.91              |
| BÇ-2-2 | 55     | 0.8 (12.8)  | 12.02      | 47.51             | 8.44              |
| BÇ-2-3 | 55     | 0.9 (14.4)  | 11.15      | 48.54             | 8.20              |
| BÇ-2-4 | 55     | 1 (16.0)    | 11.44      | 49.10             | 7.97              |
| BÇ-3-1 | 60     | 0.4 (6.4)   | 11.61      | 37.65             | 7.97              |
| BÇ-3-2 | 60     | 0.5 (8.0)   | 11.84      | 36.68             | 7.11              |
| BÇ-3-3 | 60     | 0.6 (9.6)   | 11.53      | 39.28             | 7.30              |

#### 4.3.1. YFC katkılı çimento harçları

YFC katkılı çimento harcının optimum oranlarının bulunabilmesi için %5, %10, %15, %20, %25, %30, %40 ve %50 oranlarında YFC çimento yerine ikame edilerek harçlar oluşturulmuştur. Bu harçlar ön deneylere tabii tutularak her oran için optimum değerler aranmıştır. Bu kapsamda 30 farklı oranda YFC katkısı içeriğine sahip YFC katkılı çimento harcı hazırlanmıştır. Bu numunelerin segregasyon durumu, akışkanlık süresi, 3 günlük basınç ve eğilme dayanımı testleri sonuçları incelenmiştir. İlk yapılan analizlerin sonuçlarına göre 30 tür numune örneği sayısı elenerek 8'e düşürülmüştür. Her harçta farklı oranlarda su/çim ve süper akışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda bazı harçlarda Şekil 3.1'deki gibi segregasyon meydana geldiği görülmüştür (Örneğin YFC-3-4). Ayrıca bazı harçların akışkanlık süresi 10-14 saniye arasında çıkmamıştır (Örneğin YFC-8-3). Çizelge 4.4'te harçların içerikleri ve

performans deneyleri olan basınç ve eğilme değerleri görülmektedir. Çizelge 4.5 incelendiğinde YFC ve süper akışkanlaştırıcı oranlarının artmasının segregasyona sebep olduğu görülmektedir. Çizelge 4.5'e göre YFC katkılı çimento harcı içerisinde kullanılan süper akışkanlaştırıcı katkı oranının %0.6'nın üzerine çıkılmasıyla segregasyon gözlemlendiği söylenebilir.

**Çizelge 4.5.** YFC katkılı harçlara yapılan ön deneylerin sonuçları

| Numune  | su/çim | Akış. Katkı | YFC. Katkı | Akışkanlık | Seg | Basınç<br>(3 günlük) | Eğilme<br>(3 günlük) |
|---------|--------|-------------|------------|------------|-----|----------------------|----------------------|
|         | %      | %           | %          | sn         |     | MPa                  | MPa                  |
| YFC-1-1 | 50     | 1           | 5          | 13.84      | +   | 37.11                | 3.03                 |
| YFC-1-2 | 55     | 0.9         | 5          | 11.7       | +   | 30.40                | 2.63                 |
| YFC-1-3 | 55     | 0.6         | 5          | 11.53      |     | 30.32                | 2.88                 |
| YFC-1-4 | 55     | 0.4         | 5          | 13.1       |     | 28.31                | 2.95                 |
| YFC-2-1 | 55     | 0.5         | 10         | 11.46      |     | 29.76                | 2.55                 |
| YFC-2-2 | 55     | 0.4         | 10         | 12.5       |     | 26.97                | 2.75                 |
| YFC-2-3 | 55     | 0.3         | 10         | 13.14      |     | 25.78                | 2.35                 |
| YFC-3-1 | 50     | 0.8         | 15         | 11.92      | +   | 27.18                | 1.82                 |
| YFC-3-2 | 50     | 0.5         | 15         | 11.29      |     | 26.14                | 2.35                 |
| YFC-3-3 | 47.5   | 0.5         | 15         | 13.26      |     | 32.12                | 2.95                 |
| YFC-3-4 | 47.5   | 0.7         | 15         | 13.58      | +   | 29.83                | 2.60                 |
| YFC-4-1 | 55     | 0.5         | 20         | 12.41      |     | 23.55                | 2.50                 |
| YFC-4-2 | 55     | 0.4         | 20         | 12.82      |     | 26.07                | 5.74                 |
| YFC-4-3 | 50     | 1           | 20         | 13.69      | +   | 21.48                | 2.80                 |
| YFC-5-1 | 52.5   | 0.6         | 25         | 12.58      |     | 22.15                | 2.45                 |

(Devamı arkada)

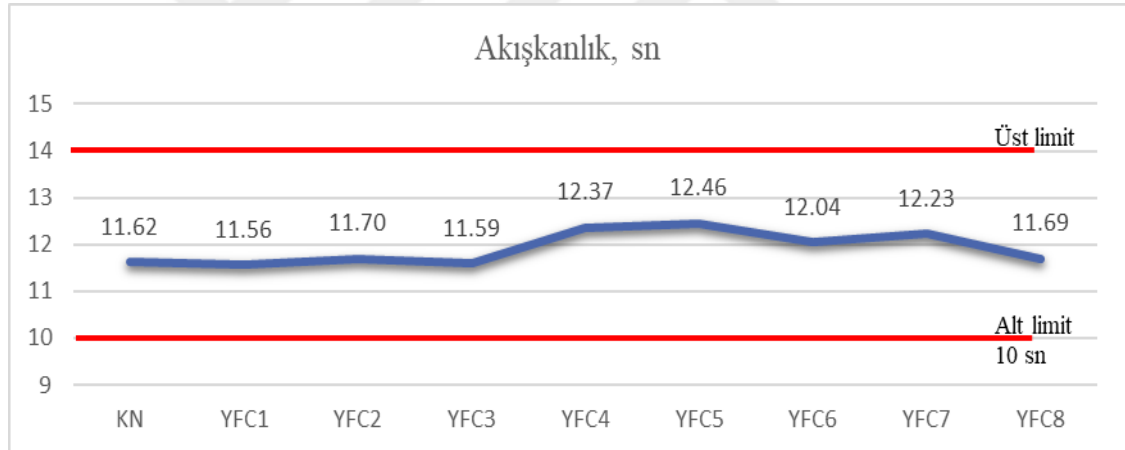
Çizelge 4.5'in devamı

| Numune  | su/çim | Akış. Katkı | YFC. Katkı | Akışkanlık | Seg | Basınç<br>(3 günlük) | Eğilme<br>(3 günlük) |
|---------|--------|-------------|------------|------------|-----|----------------------|----------------------|
|         | %      | %           | %          | sn         |     | MPa                  | MPa                  |
| YFC-5-2 | 50     | 0.6         | 25         | 13.67      |     | 23.36                | 2.15                 |
| YFC-6-1 | 55     | 0.5         | 30         | 11.25      |     | 21.34                | 2.05                 |
| YFC-6-2 | 52.5   | 0.5         | 30         | 13.26      |     | 23.22                | 2.15                 |
| YFC-6-3 | 52.5   | 0.7         | 30         | 12.07      |     | 22.81                | 1.95                 |
| YFC-6-4 | 50     | 0.8         | 30         | 12.84      |     | 23.20                | 2.25                 |
| YFC-7-1 | 50     | 0.5         | 40         | 14.23      |     | 19.43                | 2.25                 |
| YFC-7-2 | 50     | 0.6         | 40         | 13.77      |     | 17.49                | 2.05                 |
| YFC-7-3 | 50     | 0.7         | 40         | 12.34      | +   | 19.22                | 1.95                 |
| YFC-7-4 | 52.5   | 0.6         | 40         | 12.09      |     | 18.75                | 1.85                 |
| YFC-8-1 | 52.5   | 0.6         | 50         | 11.96      | +   | 14.05                | 1.35                 |
| YFC-8-2 | 50     | 0.6         | 50         | 11.77      | +   | 13.83                | 1.25                 |
| YFC-8-3 | 45     | 0.6         | 50         | 15.42      |     | 19.64                | 1.75                 |
| YFC-8-4 | 47.5   | 0.6         | 50         | 13.32      |     | 16.23                | 1.55                 |
| YFC-8-5 | 47.5   | 0.8         | 50         | 13.13      |     | 13.64                | 1.45                 |
| YFC-8-6 | 55     | 0.6         | 50         | 11.86      |     | 12.46                | 1.45                 |

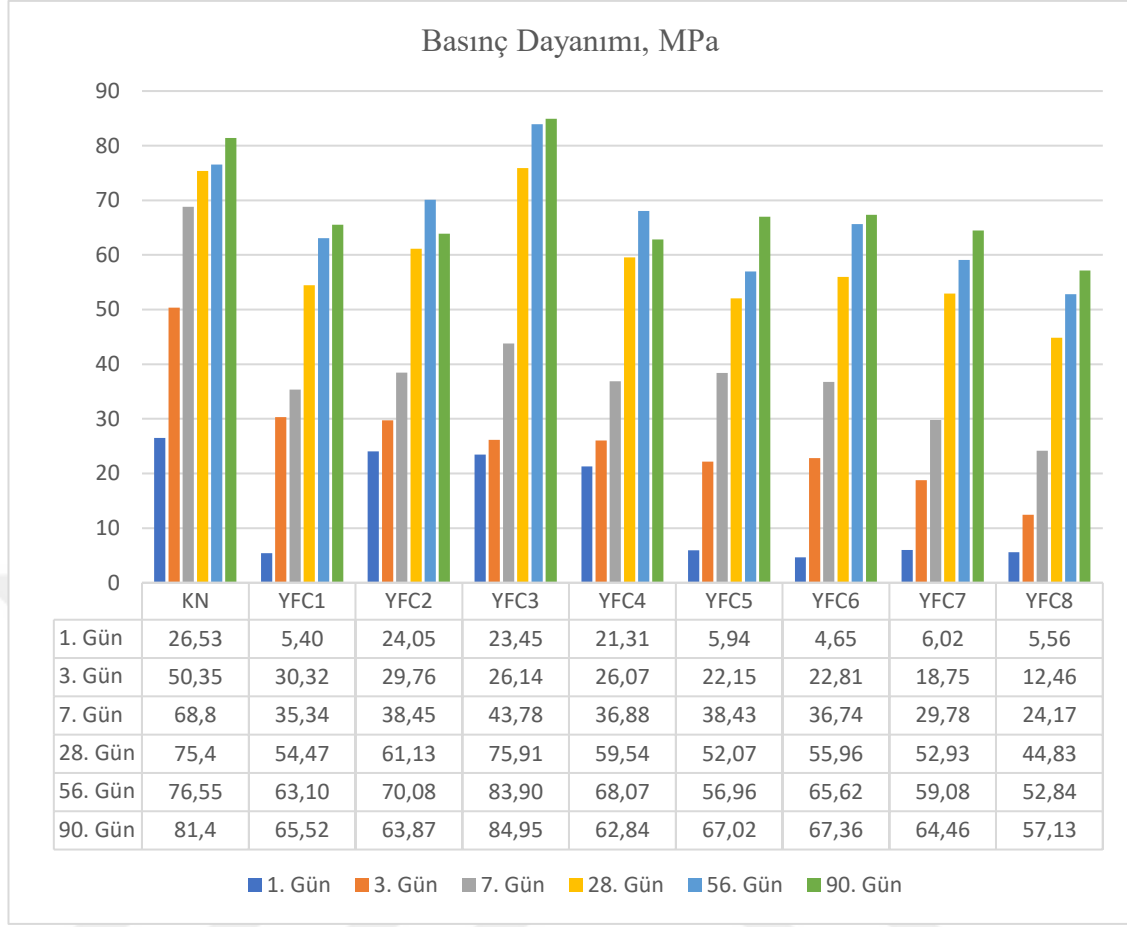
Çizelge 4.6 incelendiği zaman, 30 farklı numune içerisinde akışkanlık performansı göz önünde bulundurularak her bir YFC oranına sahip 8 numune seçilmiştir.

**Çizelge 4.6.** Seçilen YFC katkılı çimento harçlarının içeriği

| Numune         | su/çim (%) | akış. katkı (%) | YFC katkı (%) |
|----------------|------------|-----------------|---------------|
| YFC1 (YFC-1-3) | 55         | 0.6             | 5             |
| YFC2 (YFC-2-1) | 55         | 0.5             | 10            |
| YFC3 (YFC-3-2) | 50         | 0.5             | 15            |
| YFC4 (YFC-4-2) | 55         | 0.4             | 20            |
| YFC5 (YFC-5-1) | 52.5       | 0.6             | 25            |
| YFC6 (YFC-6-3) | 52.5       | 0.7             | 30            |
| YFC7 (YFC-7-4) | 52.5       | 0.6             | 40            |
| YFC8 (YFC-8-6) | 55         | 0.6             | 50            |

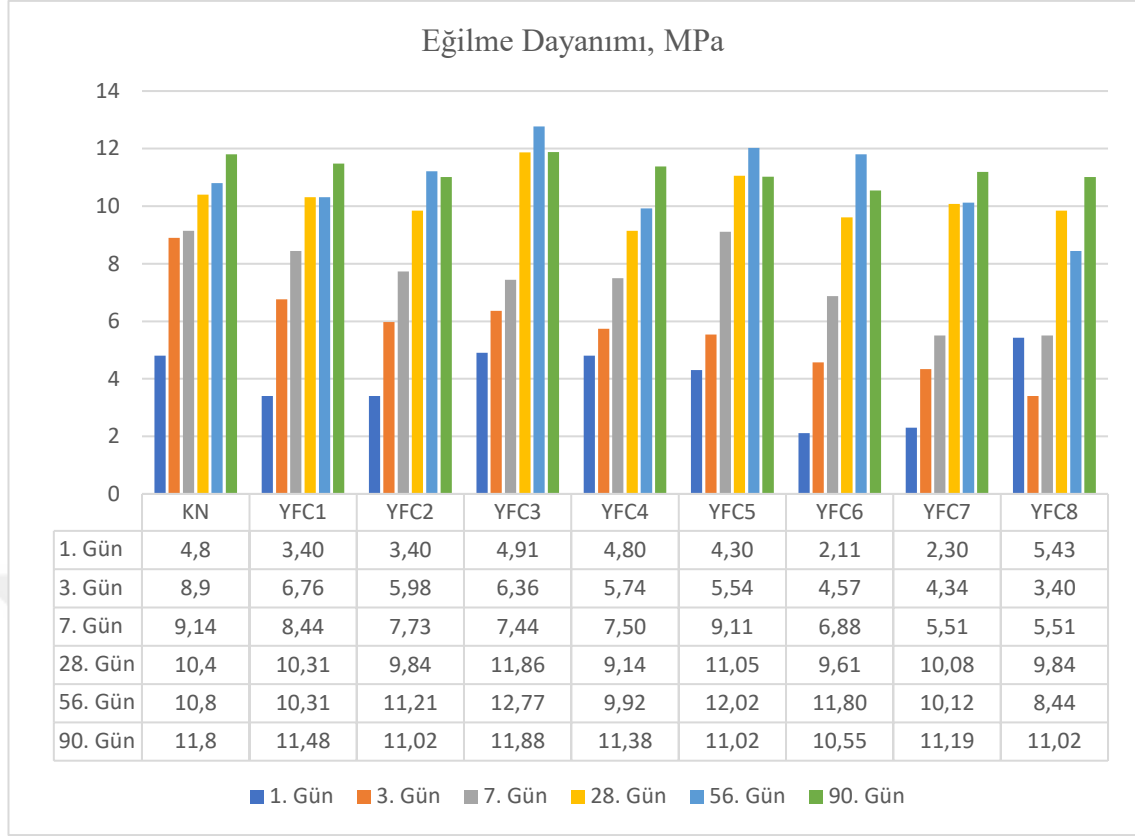
**Şekil 4.1.** YFC katkılı numunelerin akışkanlık sonuçları

Şekil 4.1’de YFC katkılı çimento harçlarının akışkanlık deneylerinin sonuçları grafik olarak gösterilmiştir. Akışkanlık süreleri incelendiği zaman su/çim oranı ve akışkanlaştırıcı katkı arttığı zaman harcın daha akışkan olduğu gözlemlenmiştir. YFC ikame oranının artması ile akışkanlık süresinin de arttığı görülmüştür.



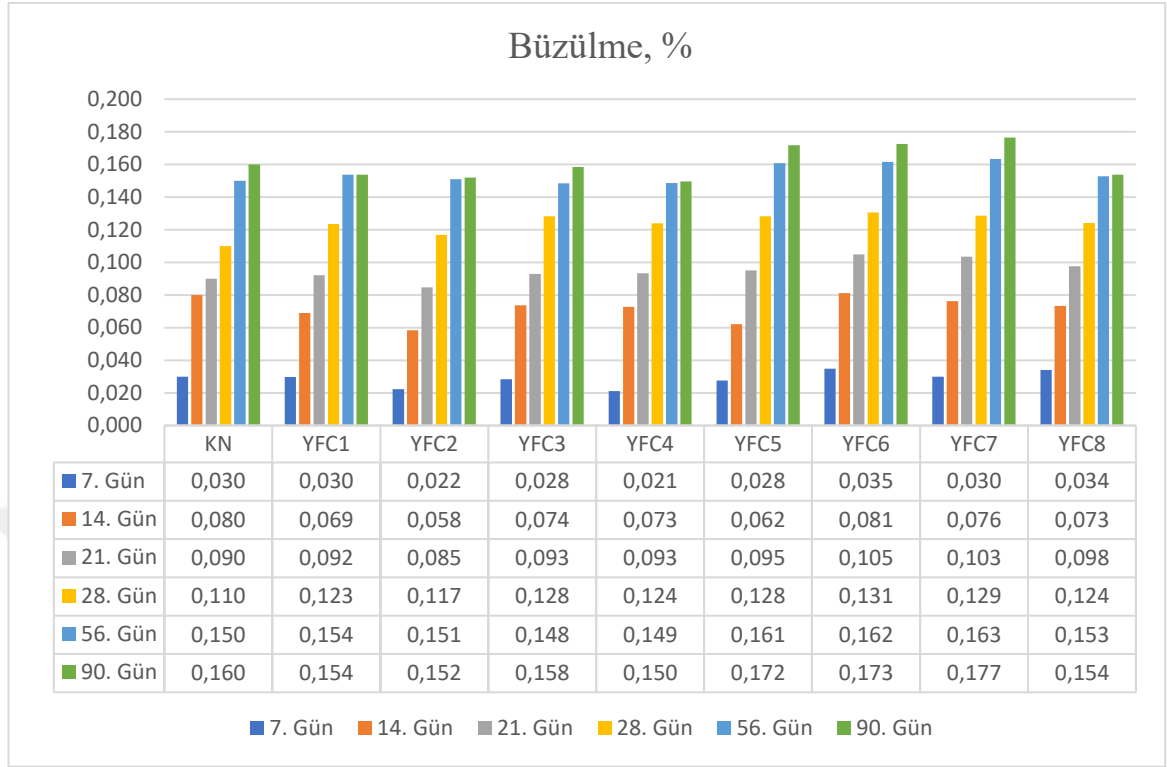
**Şekil 4.2.** YFC içerikli çimento harçlarının basınç dayanımı değerleri

Şekil 4.2’de YFC içerikli çimento harçlarının basınç dayanımı değerleri gösterilmiştir. 1. gün için en yüksek basınç dayanımı; YFC2 ve YFC3, 3. gün için en yüksek basınç dayanımı; YFC1 ve YFC2, 7. gün için en yüksek basınç dayanımı; YFC3, 28. gün için en yüksek basınç dayanımı; YFC3, 56. gün için en yüksek basınç dayanımı; YFC3 ve 90. gün için en yüksek basınç dayanımı; YFC3 numunelerinde elde edilmiştir. Bu bağlamda YFC numuneleri arasında en iyi basınç dayanımı performansını % 15 oranında katkı içeren YFC3 karşılamıştır. Daha fazla oranlarda YFC katkısı basınç dayanımı açısından olumlu bir sonuç meydana getirmemiştir. Kontrol numunesi ile karşılaştırıldığı zaman YFC3 numunesinde beklenildiği gibi uzun dönemde yüksek basınç dayanımı değeri elde edilmiştir.



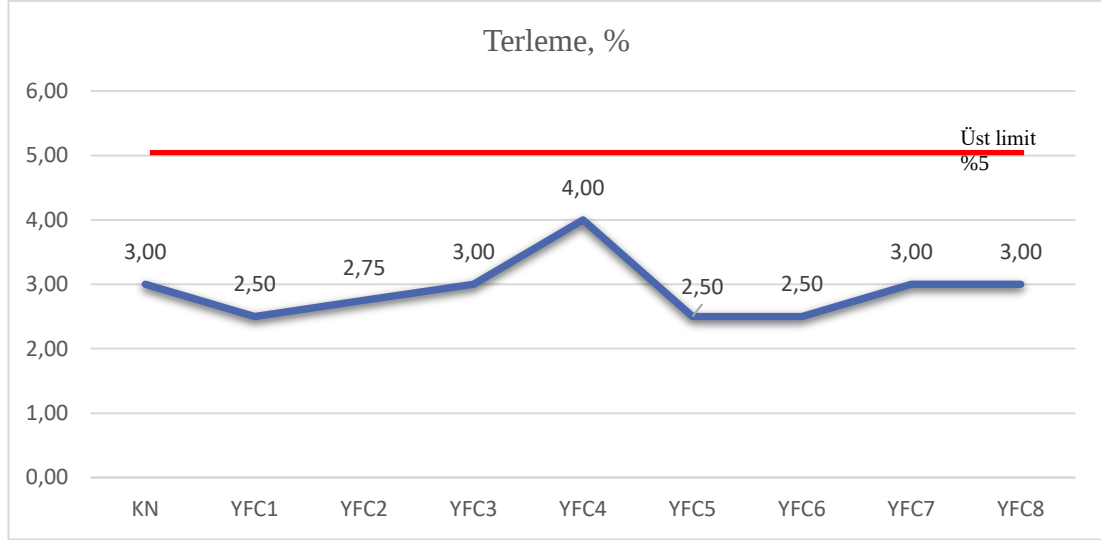
**Şekil 4.3.** YFC içerikli çimento harçlarının eğilme dayanımı değerleri

Şekil 4.3'te YFC içerikli çimento harçlarının eğilme dayanımı değerleri gösterilmiştir. Buna göre en yüksek eğilme dayanımı değerlerine; 1. gün YFC8, 3. gün YFC1, 7. gün YFC5, 28, 56, ve 90. günlerde YFC3 numunelerinde ulaşılmıştır. Bu bağlamda YFC numuneleri arasında en iyi eğilme dayanımı performansını YFC3 ve YFC5 karşılamıştır. KN ile karşılaştırdığı zaman YFC3 numunesi 28, 56 ve 90. günlerde ve YFC5 7. günde daha yüksek eğilme dayanımı değerlerini göstermiştir. Yani uzun dönem için eğilme dayanımı açısından en iyi performans YFC3 numunelerinde elde edilmiştir.



**Şekil 4.4.** YFC içerikli çimento harçlarının kuruma büzülmesi değerleri

Şekil 4.4'te kontrol numunesi ve YFC katkılı numunelerin kuruma büzülmesi deneyi sonuçları gösterilmiştir. Kuruma büzülmesi sonuçları incelendiğinde en düşük kuruma büzülmesi değeri 7 ve 90. günlerde YFC4, 14 ve 21. günlerde YFC2, 28. günde YFC1, 56. günde ise YFC3 numunesi ile elde edilmiştir. Kontrol numunesine kıyasla YFC içeren numunelerin kuruma büzülmesi değerleri daha YFC5'e kadar bir miktar düşmüştür. Yani %25 oranına kadar YFC katkısı kuruma büzülmesi açısından olumlu sonuç vermiştir. Literatür araştırmalarına göre kuruma büzülme değerinin 28 gün sonunda %0.3 olan üst limit değerinin altında olmalıdır (Guo vd. 2021). Bütün kuruma büzülmesi sonuçları sınır şart olan %0.3'ün altındadır.



**Şekil 4.5.** YFC içerikli çimento harçlarının terleme yüzdesi değerleri

Şekil 4.5'te kontrol numunesi ve YFC katkıli numunelerin terleme deneyinin sonuçları yüzde olarak gösterilmiştir. Cheng vd. (2014)'e göre YRK harcının terleme miktarının %5'in altında olması gerekmektedir. Deneysel çalışmalarda hem kontrol numunesi hem de YFC katkıli harçların terlemesi %5'in altında bulunmuştur. Şekil 4.5 incelendiğinde en düşük terleme değerlerine YFC1, YFC5 ve YFC6 kodlu numunelerin sahip olduğu görülmektedir.

#### 4.3.2. MK katkıli çimento harçları

MK katkıli çimento harcının optimum oranlarının bulunabilmesi için %2.5, 5, 7.5, 10, 12.5, 15, 17.5 ve 20 oranlarında MK çimento yerine ikame edilerek harçlar oluşturulmuştur. Bu harçlar ön deneylere tabii tutularak her oran için optimum değerler aranmıştır. Ön deneyler kapsamında 18 farklı içeriğine sahip MK katkıli çimento harcı hazırlanmıştır. Harç deneylerinde kullanılan kontrol numunelerinin performans deneyi sonuçları daha önce bu alanda yapılan bir yüksek lisans tezinden hazır olarak alınmıştır (Mahmudlu 2022). Bu numunelerin akışkanlık süresi, 3 günlük basınç ve eğilme dayanımı sonuçları incelenmiştir. Bu incelemeler sonucunda 18 farklı çimento harcı 8'e düşürülmüştür. Her harçta farklı su/çim oranı kullanılmıştır. Bazı harçların akışkanlık süresi 10-14 saniye arasında çıkmamıştır (Örneğin MK7-1). Bazı harçların da eğilme ve basınç dayanımı değerlerinin seçilen 8 numuneye göre düşük olduğu belirlenmiştir. Çizelge 4.7'de MK katkıli harçların içeriği ve deneysel çalışmaların sonuçları belirtilmiştir. Yapılan harçların hiçbirinde segregasyon gözlemlenmemiştir.

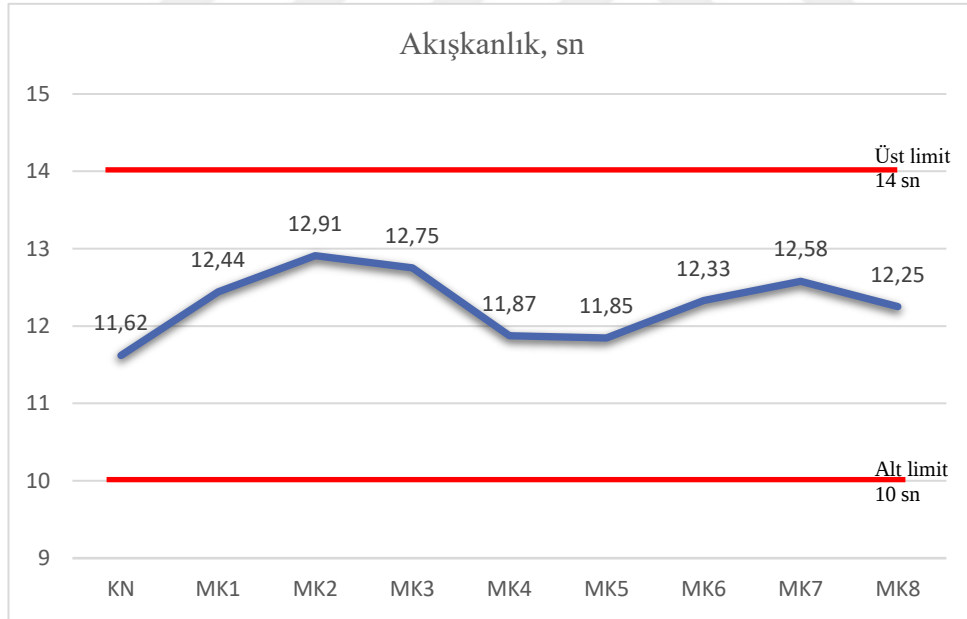
Çizelge 4.7. MK katkılı harçlara yapılan ön deneylerin sonuçları

| Numune | su/çim | Akış. katkı | MK. katkı | Akışkanlık | Basınç<br>(3 günlük) | Eğilme<br>(3 günlük) |
|--------|--------|-------------|-----------|------------|----------------------|----------------------|
|        | %      | gr          | %         | sn         | MPa                  | MPa                  |
| MK1-1  | 52.5   | 11.2        | 2.5       | 11.52      | 32.74                | 2.85                 |
| MK1-2  | 50     | 11.2        | 2.5       | 12.77      | 37.66                | 3.02                 |
| MK2-1  | 50     | 11.2        | 5         | 12.31      | 40.64                | 3.90                 |
| MK2-2  | 52.5   | 11.2        | 5         | 10.94      | 36.47                | 3.22                 |
| MK3-1  | 50     | 11.2        | 7.5       | 12.2       | 39.02                | 3.12                 |
| MK3-2  | 52.5   | 11.2        | 7.5       | 12.39      | 36.52                | 2.92                 |
| MK4-1  | 50     | 11.2        | 10        | 13.13      | 37.32                | 3.40                 |
| MK4-2  | 52.5   | 11.2        | 10        | 12.11      | 34.96                | 3.30                 |
| MK5-1  | 50     | 11.2        | 12.5      | 14.74      | 36.86                | 3.02                 |
| MK5-2  | 52.5   | 11.2        | 12.5      | 11.85      | 31.70                | 3.40                 |
| MK6-1  | 50     | 11.2        | 15        | 13.93      | 35.39                | 3.30                 |
| MK6-2  | 52.5   | 11.2        | 15        | 12.56      | 33.30                | 3.20                 |
| MK7-1  | 50     | 11.2        | 17.5      | 17.67      | 34.43                | 3.20                 |
| MK7-2  | 52.5   | 11.2        | 17.5      | 12.76      | 30.75                | 3.12                 |
| MK7-3  | 55     | 11.2        | 17.5      | 12.11      | 27.44                | 3.03                 |
| MK8-1  | 50     | 11.2        | 20        | 33.51      | 32.00                | 3.12                 |
| MK8-2  | 52.5   | 11.2        | 20        | 22.15      | 31.01                | 2.75                 |
| MK8-3  | 55     | 11.2        | 20        | 12.41      | 27.38                | 2.85                 |

Çizelge 4.8’de ön deneylerin sonuçlarına göre seçilen MK katkılı çimento harçlarının içerikleri belirtilmiştir.

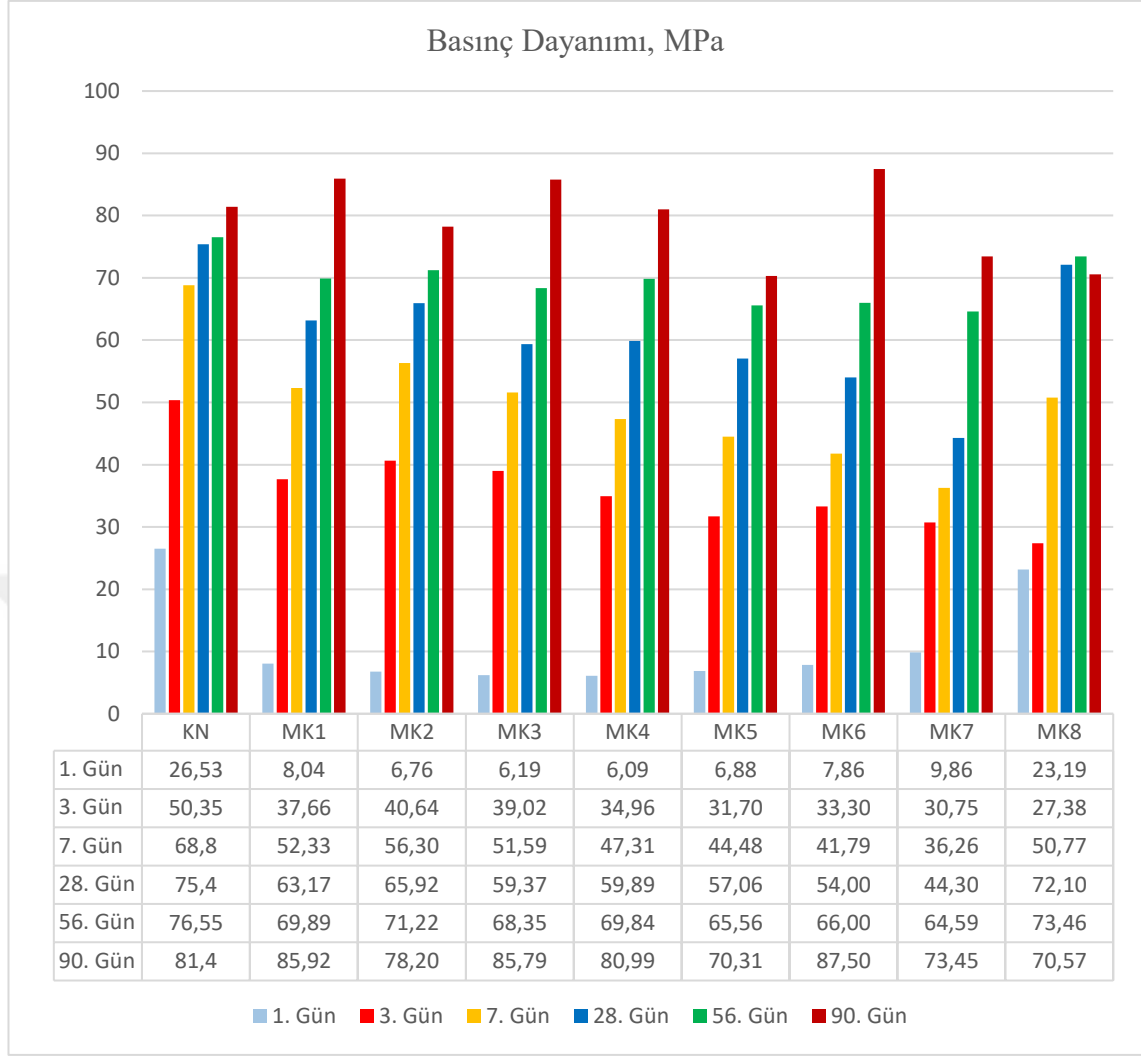
**Çizelge 4.8.** Seçilen MK katkılı çimento harçlarının içeriği

| Numune      | su/çim (%) | Akış. katkı (%) | MK katkı (%) |
|-------------|------------|-----------------|--------------|
| MK1 (MK1-2) | 50         | 0.7             | 2.5          |
| MK2 (MK2-1) | 50         | 0.7             | 5            |
| MK3 (MK3-1) | 50         | 0.7             | 7.5          |
| MK4 (MK4-2) | 52.5       | 0.7             | 10           |
| MK5 (MK5-2) | 52.5       | 0.7             | 12.5         |
| MK6 (MK6-2) | 52.5       | 0.7             | 15           |
| MK7 (MK7-2) | 52.5       | 0.7             | 17.5         |
| MK8 (MK8-3) | 55         | 0.7             | 20           |



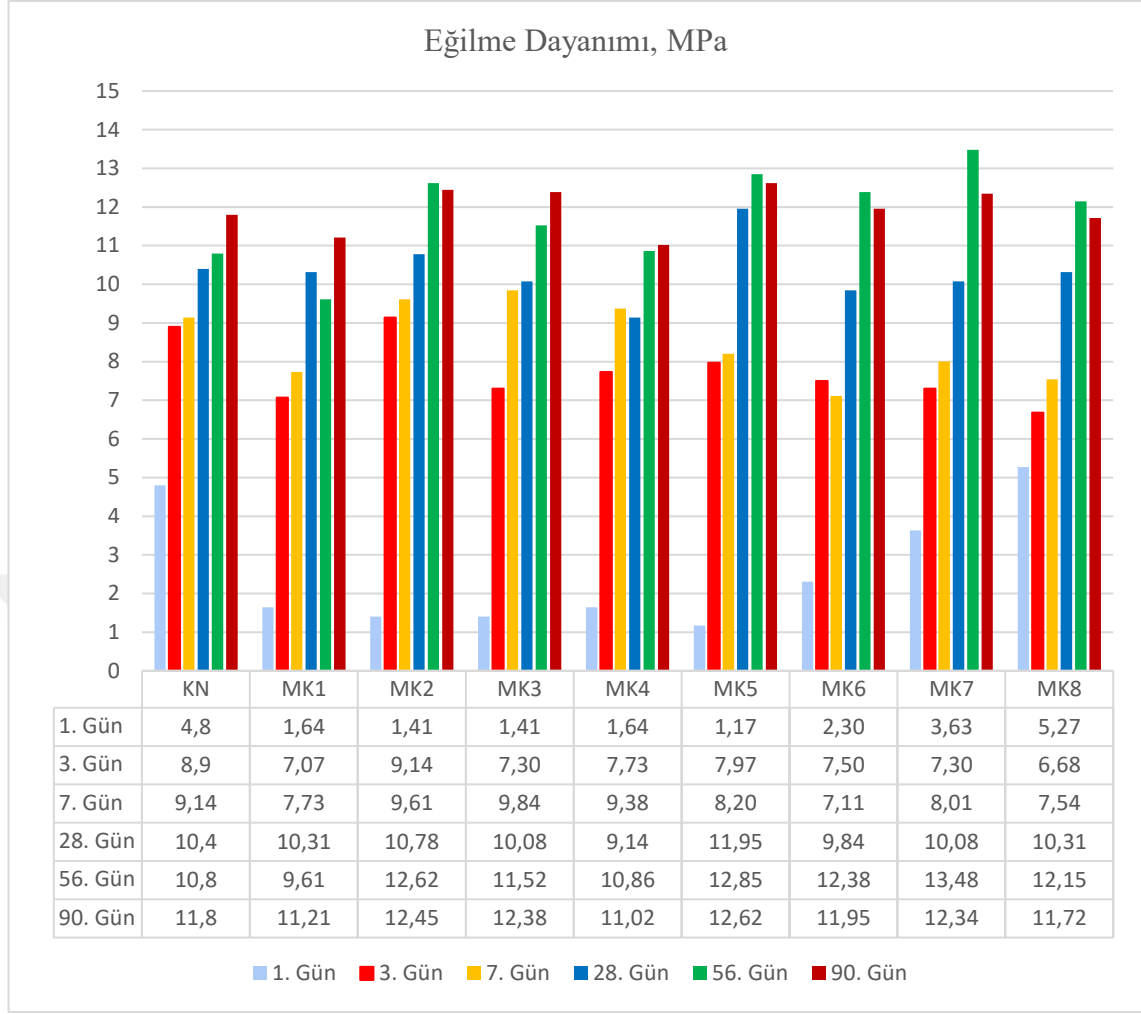
**Şekil 4.6.** MK katkılı çimento harçlarının akışkanlık süreleri

Şekil 4.6’da MK katkılı çimento harçlarının akışkanlık süreleri çizgi grafik olarak gösterilmiştir. Akışkanlık süreleri incelendiğinde, tamamının limit değerlerin içinde çıktığı görülmüştür. Ayrıca MK katkısının harç içerisinde kullanılmasıyla akışkanlık süresinin arttığı gözlemlenmiştir. Bu durumun MK katkısının yapısından ve tanecik boyutunun küçük olmasından kaynaklanarak suya daha çok ihtiyaç duymasından dolayı meydana geldiği düşünülmektedir.



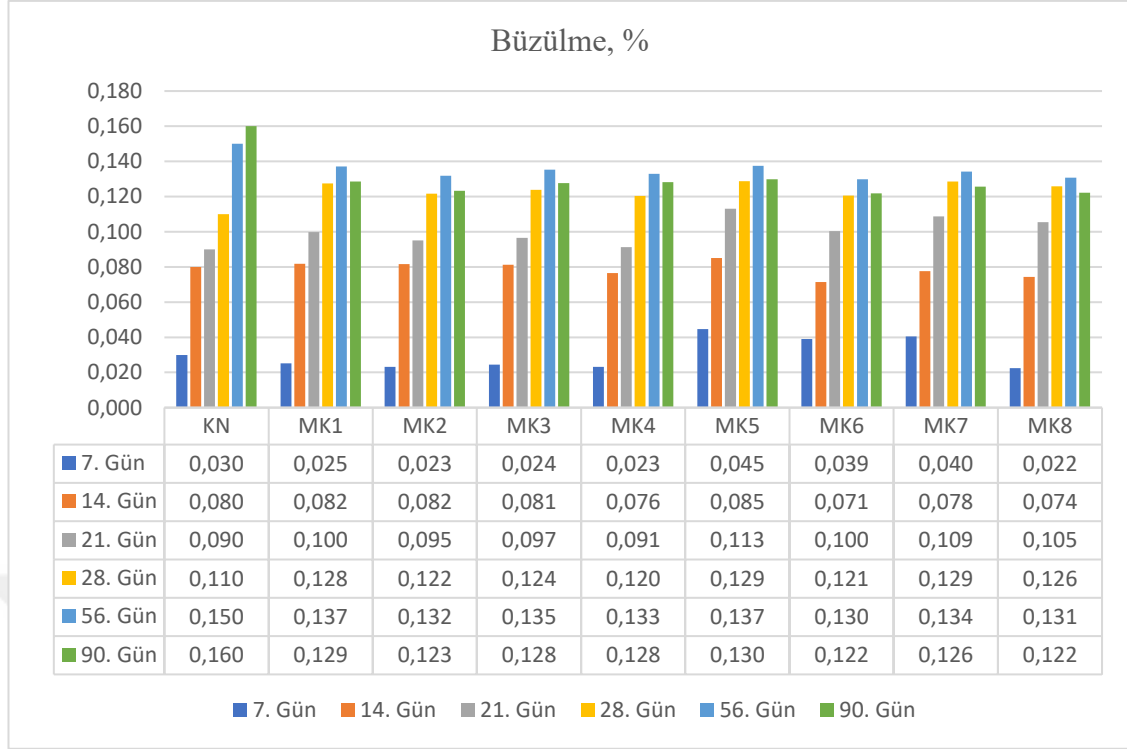
**Şekil 4.7.** MK ve kontrol numunelerin çimento harçlarının basınç dayanımı değerleri

Şekil 4.7’de kontrol numunesi ve MK katkılı çimento harçlarının basınç dayanımı değerleri gösterilmiştir. En yüksek basınç dayanımı değerlerine; 1, 28 ve 56. günlerde MK8, 3 ve 7. günlerde MK2 ve 90. günde ise MK1 ve MK6 ile ulaşılmıştır. Bu bağlamda MK katkılı numuneler arasında en iyi basınç dayanımı performansını MK2 ve MK8 karşılamıştır. %5 MK oranına sahip olan MK2 ve %20 MK oranına sahip olan MK8 kıyaslandığı zaman 56 ve 90. günler hariç en yüksek basınç dayanımına MK2 ulaşmıştır. MK katkısı, özellikle uzun dönemde (90 gün) harcın basınç dayanımını arttırmıştır.



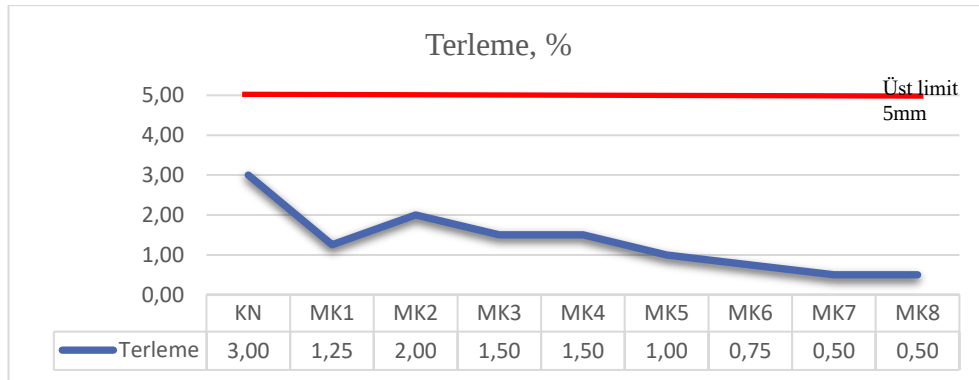
**Şekil 4.8.** MK içerikli çimento harçlarının eğilme dayanımı değerleri

Şekil 4.8’de kontrol numunesi ve MK içerikli çimento harçlarının eğilme dayanımı değerleri gösterilmiştir. En yüksek eğilme dayanımı değerlerine; 1. günde MK8, 3. gün MK2, 7. günde MK2 ve MK3, 28. günde MK5, 56. günde MK2 ve MK7 ve 90. günde MK2 ve MK5 ile ulaşılmıştır. Bu bağlamda MK içerikli numuneler arasında en iyi eğilme dayanımı performansını MK2 ve MK7 kodlu numuneler göstermiştir. MK7 ile karşılaştırıldığı zaman MK2 numunesi 3, 7 ve 28. günlerde daha yüksek eğilme dayanımına ulaşmıştır. KN ile karşılaştırıldığı zaman MK2 numunesi 3, 7, 28 ve 90. günlerde ve MK7 56. günde yüksek eğilme dayanımı değerlerini göstermiştir. MK katkısı, harcın uzun dönemde yüksek eğilme dayanımı göstermesine katkıda bulunmuştur.



**Şekil 4.9.** MK içerikli çimento harçlarının kuruma büzülmesi değerleri

Şekil 4.9’da kontrol numunesinin ve MK katkılı numunelerin kuruma büzülmesi deneyi sonuçları gösterilmiştir. Kuruma büzülmesi sonuçları incelendiğinde en düşük kuruma büzülmesi değeri 7 ve 90. günlerde MK8, 14 ve 56. günlerde MK6, 21 ve 28. günlerde MK4 numunelerinde elde edilmiştir. Kontrol numunesiyle kıyaslandığı zaman 7. gün MK1, MK2, MK3, MK4 ve MK8; 14. gün MK4, MK6, MK7 ve MK8; 56 ve 90. günlerde bütün MK numuneleri daha düşük sonuçlanmıştır. Ancak 28 ve 56. günlerde bütün MK numuneleri KN numunesinden daha yüksek kuruma büzülmesi değerine ulaşmıştır. Yine de MK katkısı genel olarak KN’ye göre daha düşük kuruma büzülmesi değerinin elde edilmesini sağlamıştır. Bu bağlamda MK’nin kuruma büzülmesi performansına etkisinin olumlu yönde olduğu gözlemlenmiştir. Bütün kuruma büzülmesi sonuçları sınır şartı olan %0.3’ün altındadır.



**Şekil 4.10.** MK içerikli çimento harçlarının terleme yüzdesi değerleri

Şekil 4.10'da kontrol numunesinin ve MK katkılı numunelerin terleme miktarları gösterilmiştir. Buna göre KN en yüksek terleme yüzdesine sahip olmuştur. %17.5 MK oranıyla MK7 ve %20 MK oranıyla MK8 numuneleri %0.5 olan en düşük terleme miktarı ile sonuçlanmıştır. Harçların içerisinde MK katkısının kullanım oranı arttıkça terleme yüzdeleri azalmıştır. Deneysel çalışmalarda MK katkılı harçların terlemesi %5'in altında bulunmuştur.

#### 4.4. YRK Deneylerinin Sonuçları

##### 4.4.1. Marshall stabilite ve akma deneyi

Çizelge 4.9, Çizelge 4.10, Şekil 4.11 ve Şekil 4.12'de kontrol numunesi, YFC katkılı ve MK katkılı harç içerikli YRK numunelerinin 1, 3, 7 ve 28 günlük Marshall stabilite ve akma değerleri gösterilmiştir. Bu aşamadaki deneysel çalışmalarda şu şekilde kısaltmalar yapılmıştır:

YRK(KN): Kontrol numunesine ait YRK dizaynı

YRK(YFC): YFC3 katkısıyla hazırlanan YRK dizaynı

YRK(MK): MK2 katkısıyla hazırlanan YRK dizaynı

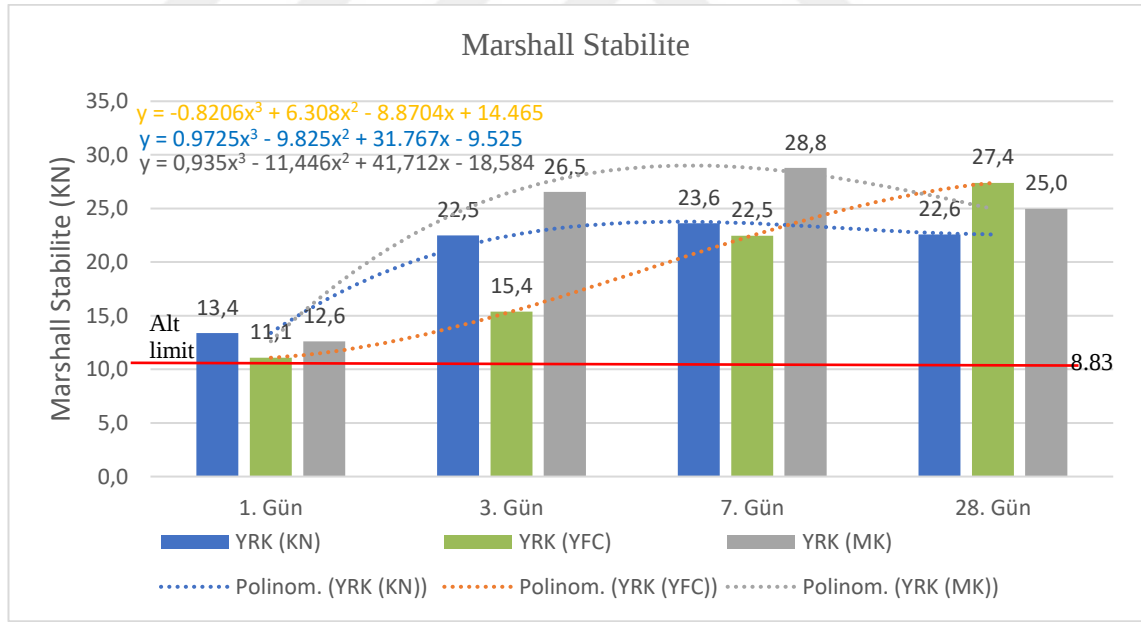
KTŞ (2013)'e göre bitümlü sıcak kaplamaların aşınma tabakasının Marshall stabilite değerinin 8.83 kN'den yüksek ve akma değeri 2-4 mm arasında olması gerekmektedir. Marshall stabilite değerleri incelendiğinde, bütün YRK numunelerinin stabilite değerlerinin KTŞ 2013'e göre alt limit olan 8.83 kN'in üzerinde çıktığı Çizelge 4.9'den görülmektedir. YRK ile ilgili literatür çalışmaları incelendiğinde Xu vd. (2021) Marshall stabilite sonuçlarını yaklaşık 25kN bulmuşlardır. Li vd. (2018) ise YRK'de Marshall stabilite değerini 20 kN olarak belirlenmişlerdir. Çizelge 4.9'daki Marshall stabilite sonuçları incelenirse, birinci günde YRK(KN), YRK(YFC) ve YRK(MK) katkılı YRK numunelerinin sonuçları birbirine yakın çıkmıştır. 3. ve 7. günlerde YRK(YFC) en düşük değerlere, YRK(MK) ise en yüksek değerlere sahip çıkmıştır. Ancak 28. günde en yüksek stabilite değeri YRK(YFC) numunesinde elde edilmiştir. Yani uzun dönemde YFC katkısı YRK'nin dayanımını arttırmıştır. Ayrıca 28. günde her iki katkı ile hazırlanan YRK numunelerinden alınan karotların stabilite değerleri, YRK (KN)'den yüksek çıkmıştır. Yani uzun dönemde her iki katkı da YRK'nin stabilitesini olumlu yönde etkilemiştir. Çizelge 4.10'da akma değerleri incelendiğinde, 28. günde tüm numunelerin akma değerlerinin 2-4 mm arasında kaldığı görülmektedir. Bu durumda, uzun dönemde her iki katkıyla hazırlanan numunelerin esneklik özelliğini koruduğu söylenebilir.

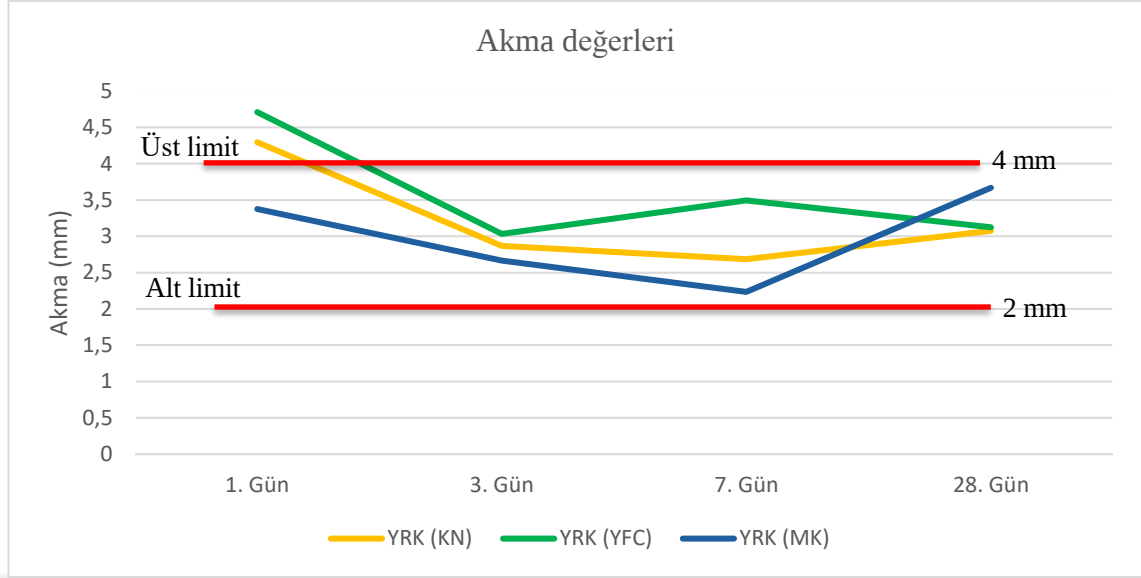
**Çizelge 4.9.** Kontrol numunesi, YFC ve MK katkılı YRK'lerin stabilite sonuçları

| Numune         | 1. Gün | 3. Gün | 7. Gün | 28. Gün |
|----------------|--------|--------|--------|---------|
| YRK (KN), kN   | 13.4   | 22.5   | 23.6   | 22.6    |
| YRK (YFC3), kN | 11.1   | 15.4   | 22.5   | 27.4    |
| YRK (MK2), kN  | 12.6   | 26.5   | 28.8   | 25.0    |

**Çizelge 4.10.** Kontrol numune, YFC ve MK katkılı YRK'nın akma sonuçları

| Numune         | 1. Gün | 3. Gün | 7. Gün | 28. Gün |
|----------------|--------|--------|--------|---------|
| YRK (KN), mm   | 4.29   | 2.87   | 2.68   | 3.07    |
| YRK (YFC3), mm | 4.71   | 3.03   | 3.49   | 3.12    |
| YRK (MK2), mm  | 3.37   | 2.66   | 2.23   | 3.66    |

**Şekil 4.11.** YRK numunelerinin Marshall stabilite sonuçları



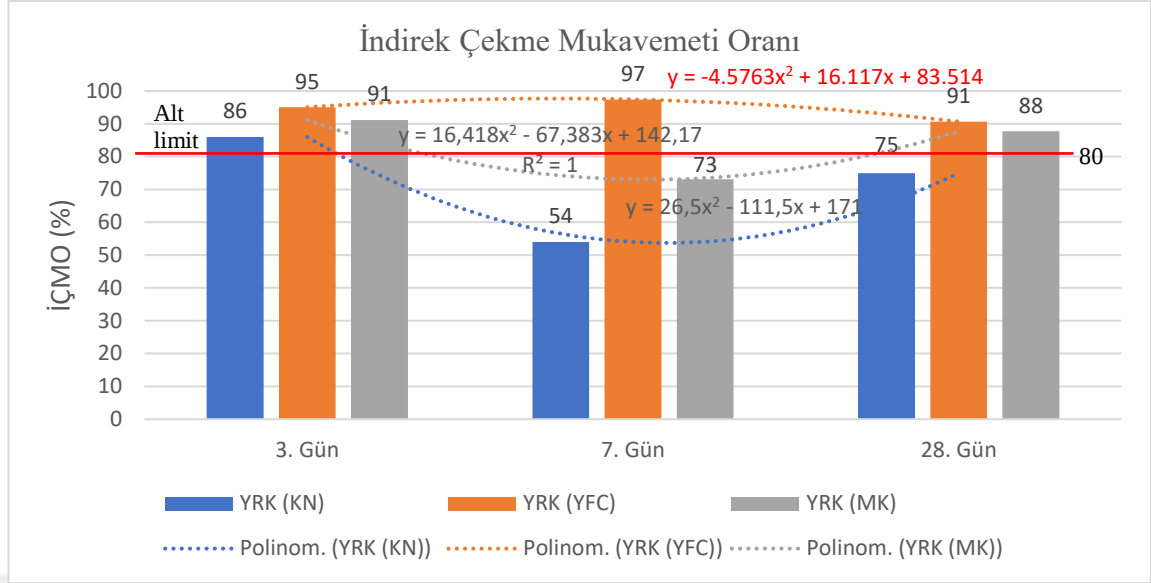
Şekil 4.12. YRK numunelerinin akma sonuçları

#### 4.4.2. Nem hasarına karşı direnç deneyi

Çizelge 4.11 ve Şekil 4.13'te kontrol numunesi, YFC katkılı ve MK katkılı harç içerikli YRK numunelerine 3, 7 ve 28 günlük kürlenme sürelerinin sonunda uygulanan nem hasarına karşı direnç deneyinin sonuçları gösterilmiştir. KTŞ (2013)'e göre İndirekt Çekme Mukavemeti Oranı (İÇMO) değerinin 0.80'in üzerinde olması gerekmektedir. YRK(KN), YRK(MK) ve YRK(YFC) numuneleri karşılaştırdığında, YRK(YFC) numunelerinin İÇMO değerleri yüksek çıkmıştır. 3. 7. ve 28. günler dikkat alındığında, her iki katkı maddesinin de kontrol numunesinin nem hasarına karşı direncini arttırdığı Çizelge 4.11 ve Şekil 4.13'te görülmektedir.

Çizelge 4.11. YRK numunelerinin İÇMO sonuçları

| Numune    | 3. Gün        |                |         | 7. Gün        |                |         | 28. Gün       |                |         |
|-----------|---------------|----------------|---------|---------------|----------------|---------|---------------|----------------|---------|
|           | Koşullu (MPa) | Koşulsuz (MPa) | İÇMO(%) | Koşullu (MPa) | Koşulsuz (MPa) | İÇMO(%) | Koşullu (MPa) | Koşulsuz (MPa) | İÇMO(%) |
| YRK (KN)  | 0.56          | 0.65           | 86      | 0.54          | 1.00           | 54      | 0.79          | 1.06           | 75      |
| YRK (YFC) | 0.71          | 0.75           | 95      | 0.83          | 0.85           | 97      | 0.75          | 0.83           | 91      |
| YRK (MK)  | 0.63          | 0.69           | 91      | 0.66          | 0.91           | 73      | 0.71          | 0.81           | 88      |



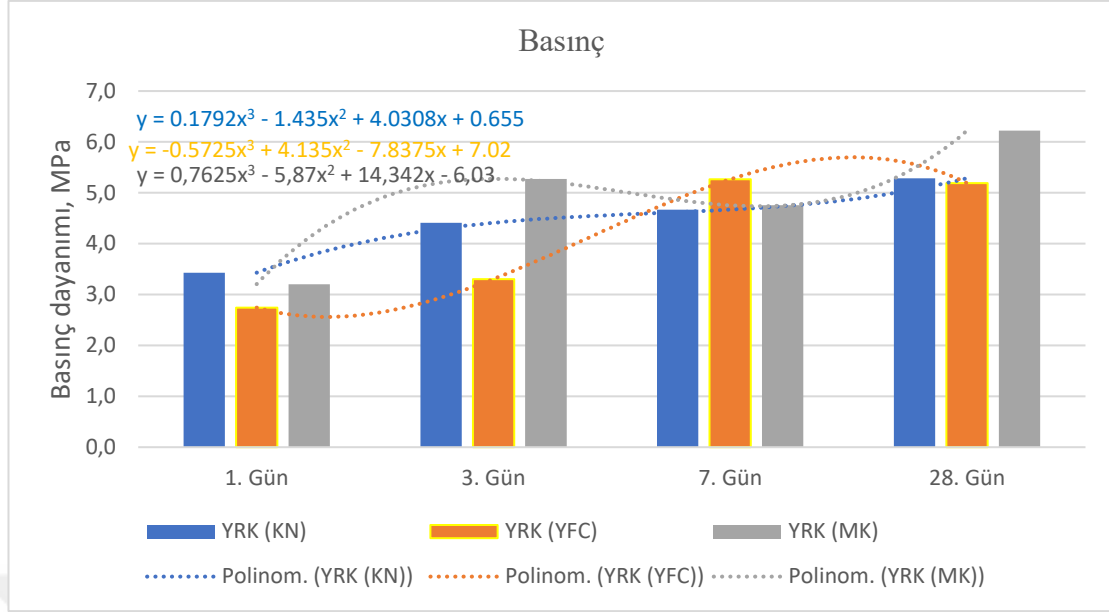
**Şekil 4.13.** YRK numunelerinin İÇMO sonuçları

#### 4.4.3. Basınç dayanımı deneyi

Çizelge 4.12 ve Şekil 4.14'te YRK numunelerinin 1, 3, 7 ve 28 günlük basınç dayanımları gösterilmiştir. Literatürde basınç dayanımı deneyleri incelendiğinde ortalama olarak bu değeri 28 günlük 4.65 MPa olduğu görülmüştür. Örneğin Ling vd. (2009) deneysel olarak gerçekleştirdikleri YRK çalışmalarında ortalama basınç dayanımı değerini 4.66 MPa bulmuşlardır. YRK(KN), YRK(YFC) ve YRK(MK) numunelerinin basınç dayanımı değerleri karşılaştırdığında, YRK(YFC) numunelerinin değerleri 1. 3. ve 28. günde YRK (KN)'den düşük çıkmıştır. Yani YFC katkısı, YRK'ye basınç dayanımı açısından olumlu bir katkı yapmamıştır. YFC katkısından beklenen uzun dönem (28 gün üzere) dayanımı arttırmasıdır. Ancak tezdeki deneysel çalışmalar, pandemi nedeni ile tez süresinin kısıtlı olmasından dolayı 28 gün ile sınırlı tutulmuştur. YRK(KN) ile YRK(MK) numuneleri karşılaştırdığında 1. ve 7. günde sonuçlar birbirine yakın çıkmıştır. 3. ve 28. günde ise YRK (MK)'nin değerleri YRK (KN)'den yüksek çıkmıştır. 28 günlük basınç dayanımı sonuçları incelendiğinde YRK(MK); YRK(KN) ve YRK (YFC)'den yaklaşık %18 daha yüksek çıkmıştır. Bu durumda MK'nin YRK'ye yüksek basınç dayanımı katkısı sağladığı söylenebilir.

**Çizelge 4.12.** YRK numunelerinin basınç dayanımları

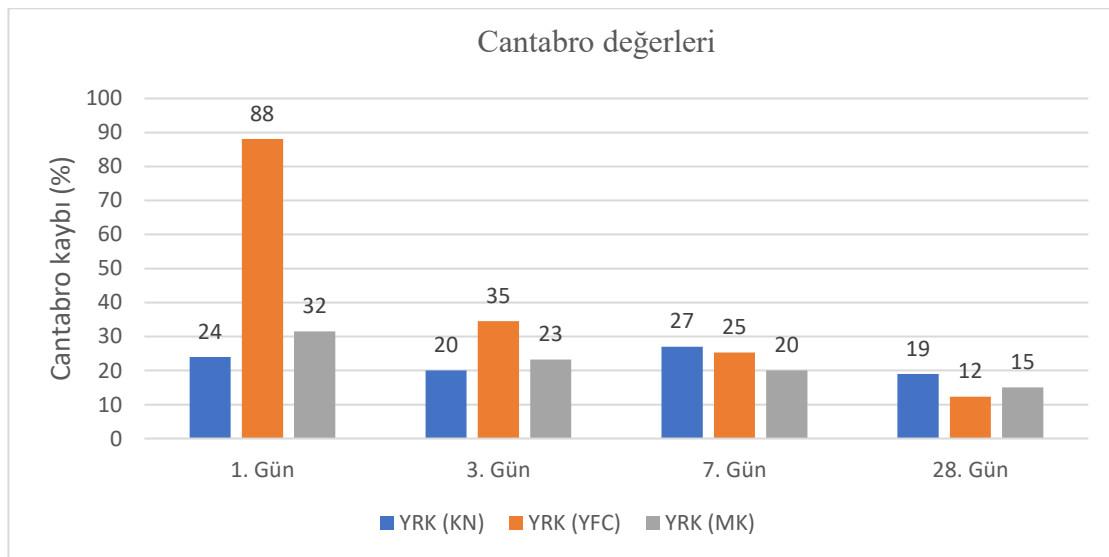
| Numune         | 1. Gün | 3. Gün | 7. Gün | 28. Gün |
|----------------|--------|--------|--------|---------|
| YRK (KN), MPa  | 3.4    | 4.4    | 4.7    | 5.3     |
| YRK (YFC), MPa | 2.7    | 3.3    | 5.3    | 5.2     |
| YRK (MK), MPa  | 32     | 5.3    | 4.8    | 6.2     |



Şekil 4.14. YRK numunelerinin basınç dayanımı değerleri

#### 4.4.4. Cantabro deneyi

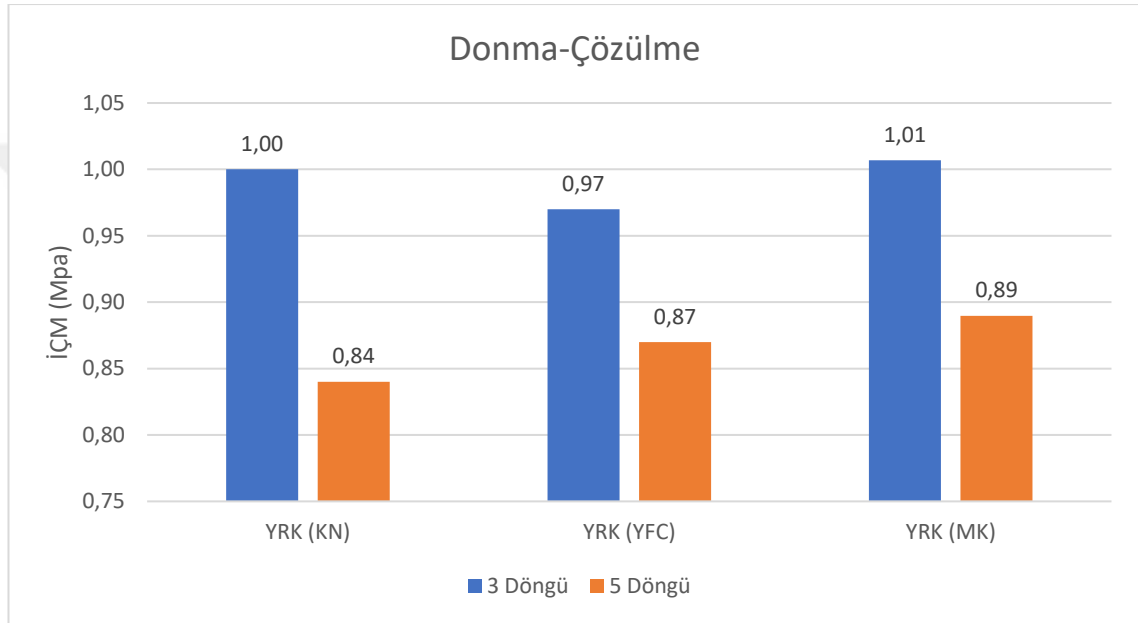
Şekil 4.15'te 1, 3, 7 ve 28 günlük YRK numunelerine ait Cantabro deneylerinin sonuçları gösterilmiştir. Sonuçlara göre; YRK(KN) ile YRK(YFC) karşılaştırıldığında YRK (YFC)'nin sonuçları 1. ve 3. günde YRK (KN)'ye göre olumsuz sonuç alınmıştır. Ancak 7. ve 28. günde YRK (KN)'ye göre olumlu sonuç alınmıştır. YRK(MK) ile YRK(KN) kıyaslandığında, 1. ve 3. günlerde YRK (KN)'nin değerleri YRK (MK)'ye göre iyi çıkmıştır. 7. ve 28. günlerde ise YRK(MK) en düşük cantabro değerine sahip olmuştur. Yani numunenin yüksek darbelenmeye karşı dayanımı açısından, her iki katkı malzemesi de YRK'yi olumlu yönde etkilemiştir.



Şekil 4.15. YRK numunelerinin Cantabro değerleri

#### 4.4.5. Donma-çözülme deneyi

Şekil 4.16’da donma-çözülme deneyinin 3 ve 5 donma-çözülme döngüsü sonucunda bulunan değerleri gösterilmiştir. Sonuçlara göre YRK(KN) döngü sonunda %16, YRK(YFC) için %10 ve YRK(MK) için %12 dayanım kaybı meydana gelmiştir. Buna göre YRK(KN) 3. döngüde en düşük değere sahip olmuştur. 5. döngünün sonunda en yüksek değere YRK(MK) sahip olmuştur. YRK (MK)’nin 3 ve 5 döngü sonunda YRK(KN) ve YRK(YFC)’den daha iyi performans göstermiştir. Uzun dönem (5 döngü) donma-çözünme dayanımını dikkate alırsak, her iki katkı maddesi de YRK’ye olumlu katkıda bulunmuştur.



Şekil 4.16. KN, YFC ve MK katkılı YRK’nın donma-çözülme değerleri

#### 4.4.6. Permeabilite deneyi

Çizelge 4.13’te YRK numunelerinin yatay ve düşey permeabilite sonuçları gösterilmiştir. Çizelgeye göre YRK(KN), YRK(YFC) ve YRK(MK) numunelerinde düşey ve yatay permeabilite değerleri az çıkmıştır. Bu sonuçlar göre YRK numunelerinde su geçirimsizliği durumu meydana gelmemiştir.

Çizelge 4.13. YRK numunelerinin düşey ve yatay permeabilite sonuçları

| Numune    | Düşey                       | Yatay                     |
|-----------|-----------------------------|---------------------------|
| YRK (KN)  | 0.00000221x10 <sup>-3</sup> | 0.000624x10 <sup>-3</sup> |
| YRK (YFC) | 0.00000205x10 <sup>-3</sup> | 0.000577x10 <sup>-3</sup> |
| YRK (MK)  | 0.00000215x10 <sup>-3</sup> | 0.000610x10 <sup>-3</sup> |

#### 4.4.7. Yüzey pürüzlülüğü deneyi

Çizelge 4.14'te YRK numunelerinin yüzey pürüzlülüğü deneyine ait sonuçları gösterilmiştir. BS 7976-2'ye göre güvenli bir ulaşım için gerekli olan yüzey pürüzlülüğü değeri 54 BPN'dir. Çizelge 4.13'te görüldüğü gibi, bütün YRK numunelerinin yüzey pürüzlülüğü değeri 54'ten yüksek çıkmıştır. Bu sonuçlar, YRK'nin yol güvenliği açısından uygun olduğunu göstermektedir.

**Çizelge 4.14.** YRK numunelerinin yüzey pürüzlülüğü sonuçları

| Numune    | 1. Ölçüm | 2. Ölçüm | 3. Ölçüm | 4. Ölçüm | 5. Ölçüm | Ortalama |
|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| YRK (KN)  | 56       | 55       | 55.5     | 58       | 56.4     | 56.2     |
| YRK (YFC) | 58       | 56       | 57.8     | 59       | 57       | 57.6     |
| YRK (MK)  | 60       | 59       | 64       | 64.6     | 65       | 62.5     |

## 5. SONUÇLAR

Tez çalışması iki aşamadan oluşmuştur. İlk aşamada YFC ve MK ikameli YRK dolgu harcının performansı araştırılmıştır. Oluşturulan harçlar basınç ve eğilme dayanımı, büzülme ve terleme deneylerine tabi tutulmuştur. İkinci aşamada ise boşluklu asfalta optimum harç yerleştirilmiş ve YRK elde edilerek performans deneyleri yapılmıştır. YRK numunelerine Marshall Stabilite ve Akma, Nem Hasarına Karşı direnç, Basınç dayanımı, Donma Çözülme, Permeabilite ve Cantabro deneyleri uygulanmıştır. Elde edilen bulgular doğrultusunda sonuçlar üç grupta aşağıdaki gibi değerlendirilmiştir.

YFC katkılı harç ile ilgili elde edilen sonuçlar:

- Beyaz çimentolu harcın basınç ve eğilme dayanımları maksimum sınır değerlerinin üstünde çıktığı için harcın rijitliği çok artmıştır. Bu neden ile YRK dizaynında beyaz çimento uygun görülmemiştir.
- YFC katkılı çimento harcı içerisinde kullanılan süper akışkanlaştırıcı katkı oranının %0.6'dan daha fazla olması durumunda, harçta segregasyon gözlemlenmiştir.
- YFC ikame miktarının artması ile akışkanlık süresi de artmıştır.
- YFC, harcın uzun dönem basınç ve eğilme dayanımını olumlu yönde etkilemiştir.
- Deneysel çalışmalarda hem kontrol numunesi hem de YFC katkılı harçların terlemesi %5'in altında bulunmuştur.
- YFC'nin bütün kuruma büzülme sonuçları sınır şart olan %0.3'ün altındadır.
- %15 YFC ikameli YFC3 harcı optimum YFC harç dizaynı olarak belirlenmiştir.

MK katkılı harç ile ilgili elde edilen sonuçlar:

- MK katkısı, tanecik boyutunun daha küçük olması nedeniyle harcı daha katı hale getirmiştir.
- MK katkısı, özellikle uzun dönemde (90 gün) harcın basınç ve eğilme dayanımını arttırmıştır.
- MK katkısı, harcın terleme ve büzülme performansını olumlu yönde etkilemiştir.
- Optimum MK katkılı harç dizaynı, %5 oranında katkıya sahip olan MK2 olarak belirlenmiştir.

YRK dizaynı ile ilgili elde edilen sonuçlar:

- Kontrol numunesine kıyasla MK harcı içeren YRK'nin Marshall stabilite değeri daha yüksek olarak belirlenmiştir.
- Akma sonuçları incelendiğinde, YFC katkısının YRK'yi kontrol numunesine kıyasla rijitleştirdiği görülmüştür.
- YFC ve MK katkıları, yarı rijit kaplamanın nem hasarına karşı performansını olumlu yönde etkilemiştir.
- MK harcı içeren YRK'nin basınç dayanımı performansı (1. gün hariç) YRK(KN) ve YRK (YFC)'ye göre daha yüksek elde edilmiştir.
- YFC ve MK katkıları darbelenmeye karşı dayanımı açısından YRK'yi olumlu yönde etkilemiştir.
- Uzun dönem (5 döngü) donma-çözünme dayanımını dikkate alırsak, her iki katkı maddesi de YRK'ye olumlu katkıda bulunmuştur.
- Bütün YRK numunelerinin geçirgenliği çok düşük olarak elde edilmiştir. Yani YRK su geçirimsizliği açısından olumlu sonuçlar vermiştir.
- Bütün YRK numunelerinin yüzey pürüzlülüğü sınır değerlerinin üstündedir. Yani YRK numunelerin yüzey pürüzlülüğü güvenlik sınırından yüksek çıkmıştır.

Deneysel olarak gerçekleştirilen tez çalışması sonucunda, YRK (MK)'nin kaplamanın uzun dönemde Marshall stabilite, basınç ve nem hasarına karşı dayanımını artırdığı tespit edilmiştir. Literatürde sadece YRK'de kullanılan harç için MK'nin kısa dönemde basınç ve eğilmeye dayanımını artırdığı ile ilgili deneysel çalışmalar mevcuttur. Ancak MK'nin harçta uzun dönem etkisi ve YRK'ye katkısıyla ilgili çalışma çok kısıtlıdır. Bu tez çalışmasıyla MK'nin YRK'ye Marshall stabilite, basınç ve nem hasarına karşı dayanımı katkısı deneysel olarak gösterilmiştir.

YRK (YFC)'nin ise deneysel çalışmalarda Marshall stabilite değerinin yüksek çıktığı, akma değeri sonuçlarına göre YRK'yi rijitleştirdiği, nem hasarına karşı kaplamanın direncini artırdığı belirlenmiştir. Ayrıca her iki katkıda darbelenme, donma-çözünme, kayma direnci açısından YRK'ye olumlu yönde etki yapmışlardır.

Tez çalışmasında gerçekleştirilen tüm deneysel çalışmaların sonuçları göz önüne alınırsa, her iki katkının da YRK'nin özelliklerine olumlu yönde iyileştirdiği tespit edilmiştir. Gelecekte yapılacak çalışmalarda ise özellikle MK ve YFC katkılarının YRK'de uzun dönem etkilerinin araştırılması önerilmektedir.

## 6. KAYNAKLAR

- AASHTO T 283, Standard Method of Test for Resistance of Compacted Asphalt Mixtures to Moisture-Induced Damage.
- AASHTO T96, Standard Method of Test for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine.
- Ambroise, J., Maximilien, S., and Pera, J. 1994. Properties of metakaolin blended cements. *Advanced Cement Based Materials*, 1(4), 161-168.
- Anonim 1: Advanced cement technologies. [www.metakaolin.com](http://www.metakaolin.com) [Son Erişim Tarihi: 30.07.2022].
- Aquino, C., Inoue, M., Miura, H., Mizuta, M., and Okamoto, T. 2010. The effects of limestone aggregate on concrete properties. *Construction and Building Materials*, 24(12), 2363-2368.
- Asi, I. M. 2007. Evaluating skid resistance of different asphalt concrete mixes. *Building and environment*, 42(1), 325-329.
- Aslani, F., and Asif, Z. 2019. Properties of ambient-cured normal and heavyweight geopolymer concrete exposed to high temperatures. *Materials*, 12(5), 740.
- ASTM 6927, Standard Test Method for Marshall Stability and Flow of Asphalt Mixtures.
- ASTM C 940, Standard Test Method for Expansion and Bleeding of Freshly Mixed Grouts for Preplaced-Aggregate Concrete in the Laboratory.
- ASTM C127, Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate.
- ASTM C128, Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate.
- ASTM C131 Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine
- ASTM C39, Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens.
- ASTM C596-09, Standard Test Method for Drying Shrinkage of Mortar Containing Hydraulic Cement.
- ASTM C939-10, Standard Test Method For Flow Of Grout For Preplaced-Aggregate Concrete (Flow Cone Method).
- ASTM D 113, Standard Test Method for Ductility of Asphalt Materials.
- ASTM E303-93, Standard Test Method for Measuring Surface Frictional Properties Using the British Pendulum Tester.
- Bonicelli, A., Preciado, J., Rueda, A., and Duarte, A. 2019. Semi-Flexible Material: A Solution for High-Performance Pavement Infrastructures. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 471, No. 3, p. 032062). IOP Publishing.

- BS 7976-2, Describes the method of conducting floor pendulum testing
- BS 812, Methods for Determination of Particle Size and Shape.
- BS EN 196-1, Methods of testing cement Determination of strength.
- Cheng, Z. Q., Kong, F. S., Jia, R. R. 2014. Study on bleeding performance of cement-based grout materials for semi-flexible pavement. *J. China Foreign Highway*, 36, 276–279
- De Oliveira, J. R. M. 2006. Grouted macadam: material characterisation for pavement design. Doctoral dissertation, University of Nottingham.
- Fang, B., Xu, T., and Shi, S. 2015. *Laboratory study on cement slurry formulation and its strength mechanism for semi-flexible pavement*. ASTM International.
- Guluyev, A. 2022. Yarı Esnek Kaplama için Değişik Gradasyonlu Poroz Asfalt Dizaynı ve Performansının Belirlenmesi. Yüksek lisans tezi, Akdeniz Üniversitesi , Antalya.
- Gong, M., Xiong, Z., Chen, H., Deng, C., Chen, X., Yang, J., and Hong, J. 2019. Evaluation on the cracking resistance of semi-flexible pavement mixture by laboratory research and field validation. *Construction and Building Materials*, 207, 387-395.
- Guo, X., and Hao, P. 2021. Influential Factors and Evaluation Methods of the Performance of Grouted Semi-Flexible Pavement (GSP)—A Review. *Applied Sciences*, 11(15), 6700.
- Gupta, A., Rodriguez-Hernandez, J., and Castro-Fresno, D. 2019. Incorporation of additives and fibers in porous asphalt mixtures: A review. *Materials*, 12(19), 3156.
- Hassani, A., Taghipoor, M., and Karimi, M. M. 2020. A state of the art of semi-flexible pavements: Introduction, design, and performance. *Construction and Building Materials*, 253, 119196.
- Hu, C., Zhou, Z., and Chen, G. 2022. Effects of different types of acid rain on water stability of asphalt pavement. *Construction and Building Materials*, 322, 126308.
- Hu, S., Huang, S., Ding, Q., and Zhang, R. 2008. Study on the cementitious mortar for semi-flexible pavement. In *International Conference on Microstructure Related Durability of Cementitious Composites* (pp. 1237-1246). RILEM Publications.
- Husain, N. M., Mahmud, H. B., Karim, M. R., and Hamid, N. B. A. A. 2010. Effects of aggregate gradations on properties of grouted Macadam composite pavement. In *2010 2nd International Conference on Chemical, Biological and Environmental Engineering* (pp. 128-131). IEEE.
- Khan, M. I., Sutanto, M. H., Napiyah, M. B., Zoorob, S. E., Al-Sabaei, A. M., Rafiq, and Memon, W. 2021. Investigating the mechanical properties and fuel spillage resistance of semi-flexible pavement surfacing containing irradiated waste PET based grouts. *Construction and Building Materials*, 304, 124641.

- Li, L. G., and Kwan, A. K. 2015. Adding limestone fines as cementitious paste replacement to improve tensile strength, stiffness and durability of concrete. *Cement and Concrete Composites*, 60, 17-24.
- Li, X., and Li, Y. 2018. Analysis of road performance of semi-flexible cement asphalt mixture. *J. Shandong Agric. Univ.(Nat. Sci. Ed.)*, 49, 815-818.
- Ling, T. Q., Qian, D., Dong, Y. Y., Zhao, Z. J., and Li, C. Z. 2009. Application of rubber asphalt in filling semi-flexible pavement. *J. Chang An Univ*, 29, 24-27.
- Mahmudlu, E. 2022. Yarı Rijit Kaplama tipi Üst Yapı Dizaynında Kullanılan Dolgu harcın Uçucu Kül ve Silis Dumanı ile Performans iyileştirilmesi. Yüksek lisans tezi, Akdeniz Üniversitesi, Antalya.
- Nazary, M. 2019. Yol üst yapısında yarı rijit kaplama dizaynında kullanılacak harç tipinin belirlenmesi. Yüksek lisans tezi, Akdeniz Üniversitesi, Antalya.
- Qian, X., and Li, Z. 2001. The relationships between stress and strain for high-performance concrete with metakaolin. *Cement and concrete Research*, 31(11), 1607-1611.
- Rogers, M. and Enright, B. 2016. *Highway engineering*. John Wiley & Sons.
- Saboo, N., Khalpada, V., Sahu, P. K., Radhakrishnan, R., and Gupta, A. 2019. Optimal proportioning of grout constituents using mathematical programming for semi flexible pavement. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 12(3), 297-306.
- Sakthivel, T., Gettu, R., and Pillai, R. G. 2019. Compressive Strength and Elastic Modulus of Concretes with Fly Ash and Slag. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series A*, 100(4), 575-584
- Siddique, R., and Klaus, J. 2009. Influence of metakaolin on the properties of mortar and concrete: A review. *Applied Clay Science*, 43(3-4), 392-400.
- Spadoni, S., Graziani, A., and Canestrari, F. 2022. Laboratory and field investigation of grouted macadam for semi-flexible pavements. *Case Studies in Construction Materials*, 16, e00853.
- Şahan, M. A. 2006. *Cem I 42, 5 Çimentolu Düşük Dozajlı Betonlarda Yüksek Fırın Cürufunun Etkinliği* (Doktora Tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- TS EN 12607-2, Bitüm ve bitümlü bağlayıcılar - Isı ve hava etkisi altında sertleşme direncinin tayini - Bölüm 2: TFOT yöntemi.
- TS EN 12697-11, Bitümlü karışımlar - Deney metotları - Sıcak karışımli asfalt için - Bölüm 11: Agregası ve bitüm arasındaki bağlanmanın tayini.
- TS EN 12697-19, Bitümlü karışımlar - Deney metotları - Sıcak karışımli asfalt için - Bölüm 19:Numunenin geçirgenliği.
- TS EN 1367-2, Agregaların termal ve bozunma özellikleri için deneyler bölüm 2: Magnezyum sülfat deneyi.
- TS EN 1426, Bitüm ve bitümlü bağlayıcılar-İğne batma derinliği tayini.

- TS EN 1427, Bitüm ve bitümlü bağlayıcılar-Yumuşama noktası tayini-Halka ve bilye yöntemi.
- TS EN 1744-1, Agregaların kimyasal özellikleri için deneyler- Bölüm 1: Kimyasal analiz.
- TS EN 933-9, Agregaların geometrik özellikleri için deneyler- Bölüm 9: İnce tanelerin tayini- Metilen mavisi deneyi.
- TS EN ISO 2592, Petrol ürünleri-Parlama ve yanma noktası tayini-Cleveland açık kap metodu.
- Türkel, S., ve Tevrişci, M. M. 2015. Metakaolin ve Akışkanlaştırıcı Katkı Kullanımının Harçların Mekanik Performansına ve Bazı Durabilite Özelliklerine Etkileri. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi* 19.1: 40-46
- Yazıcı, Ş., Anuk, D., ve Arel, H. Ş. 2010. Metakaolin kullanımının harçların mekanik özellikleri üzerine etkisi.
- Zarei, S., Ouyang, J., Yang, W., and Zhao, Y. 2020. Experimental analysis of semi-flexible pavement by using an appropriate cement asphalt emulsion paste. *Construction and Building Materials*, 230, 116994.

## ÖZGEÇMİŞ

Hasib Faisal HAFİZİ

### ÖĞRENİM BİLGİLERİ

|                            |                                                                                           |
|----------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| Yüksek Lisans<br>2020-2023 | Akdeniz Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Antalya |
| Lisans<br>2013-2016        | Dawat University, Faculty of Engineering, Civil Engineering, Kabul, Afghanistan           |

### MESLEKİ VE İDARİ GÖREVLER

|                                      |                                        |
|--------------------------------------|----------------------------------------|
| Şantiye Şefi Yardımcısı<br>2013-2014 | Focus Trade Market Construction, Kabul |
|--------------------------------------|----------------------------------------|