



**CİBRE VE ŞLEMPEDEN ELDE EDİLEN  
AKTİF KARBONUN BİTÜM KATKI MADDESİ OLARAK  
KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI**

**Elif Şeyma SEYREK**

**Yüksek Lisans Tezi**

**Anabilim Dalı: İnşaat Mühendisliği  
Programı: Ulaştırma**

**Danışman: Doç. Dr. Mehmet YILMAZ  
II. Danışman: Arş. Gör. Dr. Hasan ARSLANOĞLU**

**MART 2019**

T.C.  
FIRAT ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**CİBRE VE ŞLEMPEDEN ELDE EDİLEN AKTİF KARBONUN BİTÜM KATKI  
MADDESİ OLARAK KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI**

Yüksek Lisans Tezi

Elif Şeyma SEYREK

171115107

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 25.02.2019

Tezin Savunulduğu Tarih: 28.03.2019

Anabilim Dalı: İnşaat Mühendisliği

Programı: Ulaştırma

Danışman: Doç.Dr.Mehmet YILMAZ

Prof.Dr.Ali TOPAL

Prof.Dr.Baha Vural KÖK

MART-2019

## ÖNSÖZ

Yüksek lisansım boyunca öğrendiğim her şeyi borçlu olduğum çok değerli danışman hocam Doç. Dr. Mehmet Yılmaz başta olmak üzere, yapmış olduğum tez çalışmasında desteğini esirgemeyen, bilgi birikimlerinden faydalandığım danışman hocam Arş. Gör. Dr. Hasan Arslanoğlu'na çok teşekkür ederim.

2017 Güz döneminde başladığım yüksek lisansımda, ders aldığım çok değerli hocalarım Prof. Dr. Baha Vural Kök ve Doç. Dr. Taner Alataş'a, PAV deneyindeki yardımlarından dolayı Dr. Öğretim Üyesi Tacettin Geçkil ve yüksek lisans öğrencisi Semih İssi'ye teşekkürü bir borç bilirim. Özellikle laboratuvar çalışmalarım sırasında yardımlarını esirgemeyen saygıdeğer hocalarım Arş. Gör. Özge Erdoğan Yamaç, Arş. Gör. Muhammed Ertuğrul Çeloğlu, Arş. Gör. Dr. Erkut Yalçın, Arş. Gör. Dr. Mustafa Akpolat'a teşekkür ederim.

Maddi yönden tezimi destekleyen Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi'ne (FÜBAP) ve Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK)'a teşekkür ederim.

Son olarak desteklerini ve dualarını esirgemeyen aileme teşekkür ederim.

Elif Şeyma SEYREK

Elazığ-2019

## İÇİNDEKİLER

Sayfa No:

|                                                                                 |     |
|---------------------------------------------------------------------------------|-----|
| ÖNSÖZ.....                                                                      | II  |
| İÇİNDEKİLER .....                                                               | III |
| ÖZET .....                                                                      | IV  |
| SUMMARY .....                                                                   | VI  |
| ŞEKİLLERLER LİSTESİ .....                                                       | VII |
| TABLolar LİSTESİ .....                                                          | X   |
| 1. GİRİŞ.....                                                                   | 1   |
| 2. DOĞAL MALZEMELERİN BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIMLARDA<br>KATKI OLARAK KULLANIMI..... | 4   |
| 3. DENEY YÖNTEMLERİ .....                                                       | 13  |
| 3.1. Bağlayıcı Deneyleri .....                                                  | 13  |
| 3.1.1. Penetrasyon Deneyi.....                                                  | 13  |
| 3.1.2. Yumuşama Noktası Deneyi .....                                            | 14  |
| 3.1.3. Dönel Viskozimetre Deneyi (RV).....                                      | 15  |
| 3.1.4. Dönel İnce Film Etüvü Deneyi (RTFOT) .....                               | 16  |
| 3.1.5. Basınçlı Yaşlandırma Kabı Deneyi (PAV) .....                             | 16  |
| 3.1.6. Dinamik Kayma Reometresi Deneyi (DSR) .....                              | 18  |
| 3.1.7. Kiriş Eğme Reometresi (BBR) Deneyi .....                                 | 19  |
| 3.2. Bitümlü Sıcak Karışım Deneyleri.....                                       | 21  |
| 3.2.1.Marshall Stabilite ve Akma Deneyi .....                                   | 21  |
| 3.2.2. İndirekt Çekme Rijitlik Modülü Deneyi .....                              | 22  |
| 3.2.3. Nem Hasarına Karşı Dayanım Deneyi.....                                   | 23  |
| 3.2.4. İndirekt Çekme Yorulma Deneyi .....                                      | 25  |
| 3.2.5. Dinamik Sünme Deneyi .....                                               | 27  |

|                                                                                                     |           |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>4. DENEYSEL ÇALIŞMA.....</b>                                                                     | <b>29</b> |
| 4.1. Deneylerde Kullanılan Katkı Malzemesi.....                                                     | 29        |
| 4.1.1. Şlempe ve Cibreden Aktif Karbon Elde Edilmesi .....                                          | 29        |
| 4.1.2. Deneylerde Kullanılan Şlempe ve Cibrenin Özellikleri.....                                    | 30        |
| 4.1.3. Aktif Karbon Kullanılarak Modifiye Bitüm Hazırlanması .....                                  | 36        |
| 4.2. Aktif Karbonun Bitümlü Bağlayıcıların Reolojik Özelliklerine Etkisinin Değerlendirilmesi ..... | 37        |
| 4.2.1. Penetrasyon Deney Sonuçları .....                                                            | 37        |
| 4.2.2. Yumuşama Noktası Deney Sonuçları .....                                                       | 38        |
| 4.2.3. Bitümlü Bağlayıcıların Isıya Karşı Hassasiyetleri .....                                      | 38        |
| 4.2.4. Dönel Viskozite Deney Sonuçları .....                                                        | 39        |
| 4.2.5. Dinamik Kayma Reometresi Deney Sonuçları .....                                               | 43        |
| 4.2.6. Kiriş Eğme Reometresi (BBR) Deney Sonuçları.....                                             | 46        |
| 4.3. Agrega Deney Sonuçları.....                                                                    | 47        |
| 4.4. Bitümlü Sıcak Karışımlar Üzerinde Uygulanan Deneyler .....                                     | 49        |
| 4.4.1. Karışımların Hacimsel Özelliklerinin ve Marshall Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....   | 49        |
| 4.4.2. İndirekt Çekme Rijitlik Modülü Deney Sonuçları .....                                         | 53        |
| 4.4.3. Nem Hasarına Karşı Dayanım Deney Sonuçları.....                                              | 54        |
| 4.4.4. İndirekt Çekme Yorulma Deney Sonuçları.....                                                  | 56        |
| 4.4.5. Dinamik Sünme Deney Sonuçları .....                                                          | 60        |
| <b>5. SONUÇLAR.....</b>                                                                             | <b>68</b> |
| <b>KAYNAKLAR .....</b>                                                                              | <b>71</b> |
| <b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>                                                                                | <b>76</b> |

## ÖZET

Tez çalışmasının amacı, cibre ve şlempeden elde edilen aktif karbonun katkı maddesi olarak kullanımının bitümün reolojik özelliklerine ve bitümlü sıcak karışımların mekanik özellikleri etkisini araştırmaktır. Bu amaçla, melastan alkol üretiminin destilasyon basamağında ortaya çıkan potasyum içerikli şlempe ile şarap üretim artığı olan cibreden üretilen aktif karbon kullanılmıştır. Saf bitüm olarak PG 58-16 bitümü kullanılmış ve aktif karbon 3 farklı oranda (%5, %10 ve %15) eklenerek bitüm modifikasyonunda kullanılmıştır. Agrega olarak Elazığ Karayazı bölgesinden temin edilen kalker türü agregası kullanılmıştır.

Saf ve modifiye bitümler üzerinde penetrasyon, yumuşama noktası, dönel viskozite, dinamik kayma reometresi (DSR) ve kırılgan eğme reometresi (BBR) deneyleri uygulanmıştır. Saf ve modifiye bağlayıcılarla bitümlü sıcak karışım numuneleri hazırlanmıştır. Marshall stabilite ve akma, nem hasarına karşı dayanım, indirekt çekme rijitlik modülü, dinamik sünme ve indirekt çekme yorulma deneyleri bitümlü sıcak karışım asfalt numunelerine uygulanmıştır.

Bağlayıcı deney sonuçlarından, bitüm modifikasyonunda aktif karbon kullanımı ile bitümlü bağlayıcıların kıvamlarının ve yüksek sıcaklık performanslarının arttığı, düşük sıcaklık performanslarının çok fazla etkilenmedikleri görülmüştür. Aktif karbon modifiyeli bitümlerle hazırlanan karışımların Marshall stabilitelerinin, rijitliklerinin, yorulma çatlaklarına ve kalıcı deformasyon oluşumuna karşı dayanımlarının olumlu etkilendiği belirlenmiştir. Bitüm modifikasyonunda aktif karbon kullanımının sadece nem hasarına karşı dayanımı olumsuz etkilediği tespit edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Aktif karbon, Bitüm modifikasyonu, Bitümlü sıcak karışım, Reolojik özellikler, Mekanik özellikler

## **SUMMARY**

### **Investigation of Usability of Activated Carbon obtained from Marc and Vinasse as Bitumen Additives**

Main purpose of thesis study is to research the effect of activated carbon obtained from agricultural wastes marc and vinasse as a modifier on the rheological properties of bitumen binders and mechanical properties of hot mix asphalt. For this purpose, activated carbon, using vinasse generated at distillation step in the alcohol production from molasses together with grape marc, was used. The activated carbon was added to neat bitumen (PG 58-16) in 3 different ratios (5%, 10% and 15% of neat binder). Limestone aggregate obtained from Karayazı region of Elazığ was used in hot mix asphalt samples.

Penetration, softening point, rotational viscosity, dynamic shear rheometer (DSR) and bending beam rheometer (BBR) tests were applied on pure and modified bitumen. Hot mix asphalt samples were prepared with neat and modified binders. Marshall stability and flow, resistance to moisture-induced damage, indirect tensile stiffness modulus, dynamic creep and indirect tensile fatigue tests were applied to bituminous hot mix asphalt samples.

It was determined from the binder tests results that the use of activated carbon in bitumen modification increased the consistency and high temperature performances of bituminous binders, and low temperature performance was not affected much. It was obtained from mixture tests that Marshall stability, stiffness, resistance to fatigue cracking and permanent deformation of the mixtures were increased with activated carbon modified bitumen usage. Also, the use of activated carbon in bitumen modification adversely affects the resistance against moisture-induced damage.

**Key Words:** Activated carbon, bitumen modification, Hot mix asphalt, Rheological properties, Mechanical properties

## ŞEKİLLERLER LİSTESİ

Sayfa No:

|                                                                                        |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 1.1. Ülkemizdeki motorlu taşıt sayısının yıllara göre değişimi.....              | 1  |
| Şekil 1.2. Ülkemizdeki kamyon sayısının yıllara göre değişimi .....                    | 2  |
| Şekil 2.1. Karayolu sektöründe kullanılabilecek atıkların sınıflandırılması .....      | 4  |
| Şekil 3.1. Penetrasyon cihazı ve kabı .....                                            | 13 |
| Şekil 3.2. Yumuşama noktası cihazı.....                                                | 14 |
| Şekil 3.3. Piriç halka ve halkaların konulduğu sehpa.....                              | 14 |
| Şekil 3.4. Dönel viskozimetre cihazı .....                                             | 15 |
| Şekil 3.5. Dönel viskozimetre deney şeması .....                                       | 15 |
| Şekil 3.6. RTFOT deney cihazı ve şişeleri .....                                        | 16 |
| Şekil 3.7. PAV deney aleti ve parçaları.....                                           | 17 |
| Şekil 3.8. DSR deney cihazı .....                                                      | 18 |
| Şekil 3.9. DSR deneyi çalışma şekli.....                                               | 19 |
| Şekil 3.10. BBR numuneleri ve deney düzeneği .....                                     | 20 |
| Şekil 3.11. Marshall stabilite ve akma aleti.....                                      | 21 |
| Şekil 3.12. İklimlendirme kabini ve indirekt çekme rijitlik modülü deney düzeneği .... | 22 |
| Şekil 3.13. Piknometre ve vakum cihazı .....                                           | 24 |
| Şekil 3.14. İndirekt çekme yorulma deney düzeneği.....                                 | 26 |
| Şekil 3.15. Temsili deformasyon - yük tekrür sayısı grafiği .....                      | 26 |
| Şekil 3.16. Dinamik sünme deney düzeneği.....                                          | 27 |
| Şekil 3.17. Şekil değiştirme – yük tekrarı grafiği.....                                | 28 |
| Şekil 3.18. Akma sayısının bulunması (Bausano ve Williams, 2007) .....                 | 28 |
| Şekil 4.1. Konsantre şlempe ve cibre örnekleri. ....                                   | 30 |
| Şekil 4.2. Deneylerden elde edilen aktif karbon.....                                   | 30 |
| Şekil 4.3. Elde edilen aktif karbonun partikül boyut dağılımı.....                     | 33 |
| Şekil 4.4. Elde edilen aktif karbonun TG/DTA diyagramı. ....                           | 33 |
| Şekil 4.5. Elde edilen aktif karbonun SEM görüntüleri. ....                            | 34 |
| Şekil 4.6. Elde edilen aktif karbonun X ışını difraktogramı (XRD). ....                | 34 |
| Şekil 4.7. Modifiye bitüm mikseri ve karıştırma başlığı .....                          | 36 |
| Şekil 4.8. Penetrasyon değerlerinin aktif karbon içeriği ile değişimi.....             | 37 |



|                                                                                                                                   |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil 4.9.</b> Aktif karbon kullanımının yumuşama noktası değerlerine etkisi .....                                             | 38 |
| <b>Şekil 4.10.</b> Aktif karbonun PI değerleri üzerindeki etkisi .....                                                            | 39 |
| <b>Şekil 4.11.</b> Saf ve modifiye bitümlerin viskozite değerleri .....                                                           | 40 |
| <b>Şekil 4.12.</b> Saf bağlayıcının viskozite-sıcaklık grafiği .....                                                              | 41 |
| <b>Şekil 4.13.</b> %5 aktif karbon içeren bağlayıcının viskozite-sıcaklık grafiği.....                                            | 41 |
| <b>Şekil 4.14.</b> %10 aktif karbon içeren bağlayıcının viskozite-sıcaklık grafiği.....                                           | 42 |
| <b>Şekil 4.15.</b> %15 aktif karbon içeren bağlayıcının viskozite-sıcaklık grafiği.....                                           | 42 |
| <b>Şekil 4.16.</b> Orijinal bağlayıcıların $G^*/\sin \delta$ değerlerinin sıcaklıkla değişimi.....                                | 44 |
| <b>Şekil 4.17.</b> RTFOT sonrası bağlayıcıların $G^*/\sin \delta$ değerlerinin sıcaklıkla değişimi ....                           | 45 |
| <b>Şekil 4.18.</b> Uzun süreli yaşlandırılmış bağlayıcıların $G^*.\sin \delta$ değerlerinin sıcaklıkla değişimi.....              | 46 |
| <b>Şekil 4.19.</b> Superpave PG tablosu (Zaniewski ve Pumphrey, 2004).....                                                        | 46 |
| <b>Şekil 4.20.</b> Bağlayıcıların BBR deney sonuçları .....                                                                       | 47 |
| <b>Şekil 4.21.</b> Çalışmada kullanılan agrega gradasyonu .....                                                                   | 48 |
| <b>Şekil 4.22.</b> Karışımların boşluk oranın katkı içeriği ile değişimi .....                                                    | 50 |
| <b>Şekil 4.23.</b> Karışımların agregalar arası boşluk oranın katkı içeriği ile değişimi .....                                    | 50 |
| <b>Şekil 4.24.</b> Karışımların bitümle dolu boşluk oranı değerlerinin katkı içeriği ile değişimi .....                           | 51 |
| <b>Şekil 4.25.</b> Karışımların stabilite değerlerinin katkı içeriği ile değişimi.....                                            | 51 |
| <b>Şekil 4.26.</b> Karışımların akma değerlerinin katkı içeriği ile değişimi.....                                                 | 52 |
| <b>Şekil 4.27.</b> Karışımların Marshall Oranı (MQ) değerlerinin katkı içeriği ile değişimi ..                                    | 53 |
| <b>Şekil 4.28.</b> Karışımların ITSM değerlerinin aktif karbon içeriği ile değişimi .....                                         | 53 |
| <b>Şekil 4.29.</b> Karışımların çekme dayanımı değerlerinin katkı içeriği ile değişimi .....                                      | 54 |
| <b>Şekil 4.30.</b> Çekme dayanımı oranı değerlerinin katkı içeriği ile değişimi .....                                             | 55 |
| <b>Şekil 4.31.</b> Nf değerlerinin belirlenmesi.....                                                                              | 56 |
| <b>Şekil 4.32.</b> Saf bağlayıcı ile hazırlanan karışımların deformasyon-yük tekrar sayısı ilişkisi.....                          | 57 |
| <b>Şekil 4.33.</b> %5 aktif karbon modifiyeli bağlayıcı ile hazırlanan karışımların deformasyon-yük tekrar sayısı ilişkisi.....   | 57 |
| <b>Şekil 4.34.</b> %10 aktif karbon modifiyeli bağlayıcı ile hazırlanan karışımların deformasyon-yük tekrar sayısı ilişkisi ..... | 58 |
| <b>Şekil 4.35.</b> %15 aktif karbon modifiyeli bağlayıcı ile hazırlanan karışımların deformasyon-yük tekrar sayısı ilişkisi ..... | 58 |

|                                                                                                                                           |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil 4.36.</b> Saf ve aktif karbon modifiyeli bağlayıcı ile hazırlanan karışımların deformasyon-yük tekrar sayısı ilişkisi .....      | 59 |
| <b>Şekil 4.37.</b> Nf ve maksimum yük tekrar sayılarının katkı içeriği ile değişimi .....                                                 | 59 |
| <b>Şekil 4.38.</b> Çatlak ilerleme oranı değerlerinin katkı oranı ile değişimi .....                                                      | 60 |
| <b>Şekil 4.39.</b> Saf bağlayıcı ile hazırlanan karışımların $\epsilon_c$ – yük tekrar sayısı ilişkisi .....                              | 61 |
| <b>Şekil 4.40.</b> %5 aktif karbon içeren modifiye bağlayıcı ile hazırlanan karışımların $\epsilon_c$ – yük tekrar sayısı ilişkisi .....  | 61 |
| <b>Şekil 4.41.</b> %10 aktif karbon içeren modifiye bağlayıcı ile hazırlanan karışımların $\epsilon_c$ – yük tekrar sayısı ilişkisi ..... | 62 |
| <b>Şekil 4.42.</b> %15 aktif karbon içeren modifiye bağlayıcı ile hazırlanan karışımların $\epsilon_c$ – yük tekrar sayısı ilişkisi ..... | 62 |
| <b>Şekil 4.43.</b> Farklı karışımların $\epsilon_c$ – yük tekrar sayısı ilişkisi .....                                                    | 63 |
| <b>Şekil 4.44.</b> Karışımların 4.000 yük tekrarı sonundaki $\epsilon_c$ değerleri .....                                                  | 64 |
| <b>Şekil 4.45.</b> Saf bağlayıcı ile hazırlanan karışımın akma sayısının belirlenmesi.....                                                | 65 |
| <b>Şekil 4.46.</b> Karışımların akma sayıları .....                                                                                       | 65 |

## TABLÖLAR LİSTESİ

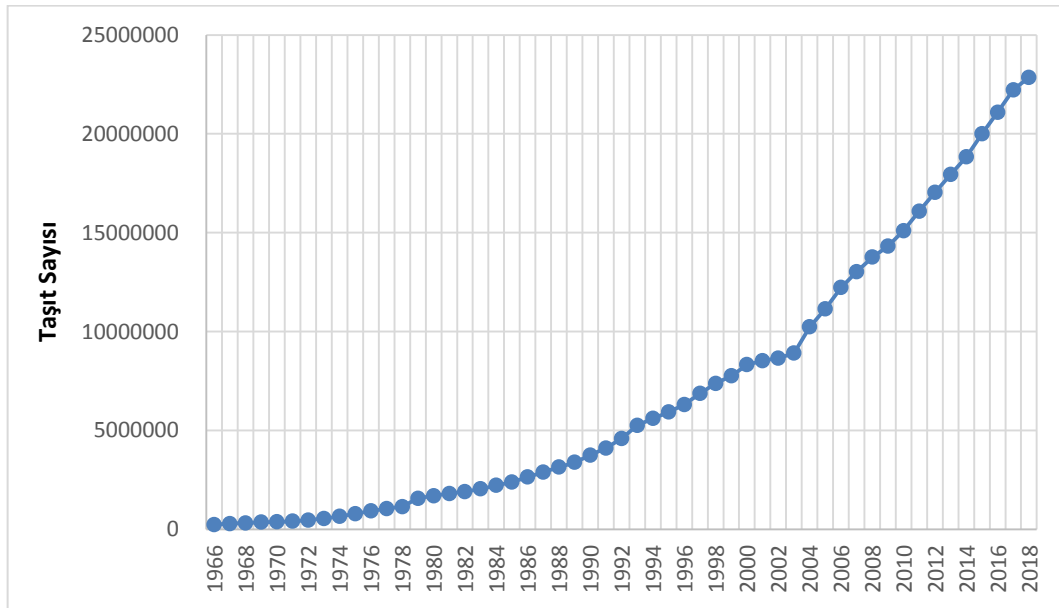
Sayfa No:

|                                                                                    |    |
|------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tablo 3.1.</b> Penetrasyon okumasında kabul edilebilen en büyük farklar .....   | 14 |
| <b>Tablo 3.2.</b> Bağlayıcı sınıfına göre uygulanacak PAV deney sıcaklıkları ..... | 18 |
| <b>Tablo 4.1.</b> Konsantre şlempenin bazı özellikleri.....                        | 31 |
| <b>Tablo 4.2.</b> Konsantre şlempenin elementel bileşimi. ....                     | 31 |
| <b>Tablo 4.3.</b> Cibrenin bazı özellikleri.....                                   | 32 |
| <b>Tablo 4.4.</b> Cibrenin elementel bileşimi. ....                                | 32 |
| <b>Tablo 4.5.</b> Elde edilen aktif karbonun özellikleri.....                      | 35 |
| <b>Tablo 4.6.</b> Karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları .....                      | 43 |
| <b>Tablo 4.7.</b> Kırmataş kalkerin özellikleri .....                              | 48 |
| <b>Tablo 4.7.</b> Asfalt betonu dizayn kriterleri .....                            | 49 |

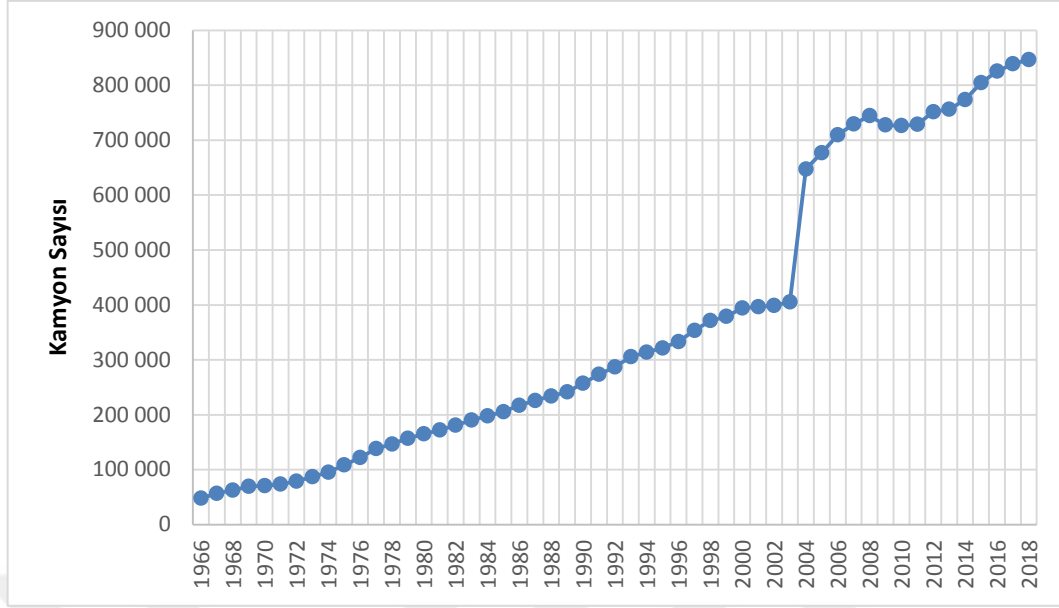
## 1. GİRİŞ

Karayolu esnek üstyapıları, tabakalı yapıya sahip olup sıkıştırılmış zemin üzerine inşa edilen alttemel, temel ve kaplama tabakalarından oluşmaktadır. Esnek üstyapılar, çok basit yapılar gibi görünmekle birlikte gerçekte çok karmaşık bir yapıya sahip olup, muhtemelen tüm inşaat mühendisliği yapılarının en karmaşık olanıdır (Ullidtz, 1987). Esnek üstyapıların kaplama tabakalarında bağlayıcı olarak bitümlü malzemeler kullanılmaktadır. Esnek üstyapı kaplama tabakaları; sathi kaplama, bitümlü sıcak karışım, ılık karışım ve soğuk karışım olmak üzere çeşitli şekillerde yapılabilmektedir. Dayanım, uygulama kolaylığı ve mevcut bilgi birikimi dikkate alındığında bitümlü sıcak karışımlar diğer kaplama türlerine göre ön plana çıkmaktadır.

Araziye uygulanmış ve kullanılmakta olan esnek üstyapı kaplama tabakaları sürekli olarak trafik yüklerine ve sıcaklık değişimlerine maruz kalmaktadır (Das, 2015). Ülkemizdeki son 40 yılda trafiğin değişimi Şekil 1.1.'de görülmektedir (TÜİK, 2018). Şekil 1.1'de görüldüğü üzere 1966 yılında ülkemizde 231.977 motorlu araç bulunurken 2018 yılında bu rakam 98,5 kat artarak 22.850.238 olmuştur. Ülkemizdeki kamyon sayısının yıllara göre değişimin görüldüğü Şekil 1.2. incelendiğinde motorlu taşıt sayısına benzer şekilde ağır ticari taşıtların sayısının da 40 yılda önemli oranda arttığı görülmektedir (TÜİK, 2018).



Şekil 1.1. Ülkemizdeki motorlu taşıt sayısının yıllara göre değişimi (TÜİK, 2018)



Şekil 1.2. Ülkemizdeki kamyon sayısının yıllara göre değişimi (TÜİK,2018)

%10'u yerli ham petrol olmak üzere ortalama yılda 20 milyon ton civarında ham petrol işleyen TÜPRAŞ rafinerileri, özellikle bitüm üretimine yönelik olarak tasarlanmış rafineriler değildir. Asfalt uygulamalarının yoğun olduğu yaz aylarında bitüm talebinin karşılanmasında sorunlar yaşanmakta, üretilen bitümün kalitesinde önemli değişiklikler olabilmektedir (ASMÜD, 2007).

Taşıt sayısı ve ağır trafikteki artış, çevresel faktörler ve bitüm kalitesindeki değişim bitümün dolayısıyla karışımın kalitesini arttırmak amacıyla katkı maddeleri kullanımını gerekli hale getirmektedir. Katkı olarak daha çok polimer türü malzemeler kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra antioksidanlar, kauçuk, soyulma önleyiciler, fiber gibi çeşitli malzemeler de katkı maddesi olarak sıklıkla kullanılmaktadır (Benhood vd., 2018). Maliyet ve çevresel yaklaşımlar düşünüldüğünde, çeşitli doğal malzemelerden elde edilen ürünler de katkı malzemesi olarak kullanılmaktadır.

Bu çalışmada, cibre ve şlempeden elde edilen aktif karbonun bitümün reolojik ve bitümlü sıcak karışımların mekanik özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Cibre ve şlempeden elde edilen aktif karbon 3 farklı oranda bitüm modifikasyonunda kullanılmıştır. Saf ve modifiye bitümler üzerinde geleneksel deneylerin yanı sıra Superpave bağlayıcı deneyleri uygulanmıştır. Saf ve modifiye bağlayıcılarla bitümlü sıcak karışım numuneleri hazırlanmış ve karışım numuneleri üzerinde Marshall stabilite

ve akma, nem hasarına karşı dayanım, indirekt çekme rijitlik modülü, dinamik sünme ve indirekt çekme yorulma deneyleri uygulanmıştır.



## 2. DOĞAL MALZEMELERİN BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIMLARDA KATKI OLARAK KULLANIMI

Karayolu esnek üstyapı yapımı, çok miktarda inşaat malzemesinin tüketimini içermektedir. Bu inşaat malzemelerinin bazıları doğal formda mevcut olup, bazıları da üretilmektedir. Karayolu ve bina inşaatlarının hızla artması nedeniyle, doğal olarak mevcut kaliteli inşaat malzemeleri yavaş yavaş azalmaktadır. Bunun sonucunda, kaliteli malzemeler temin etmek için nakliye maliyetinde bir artış meydana gelmektedir. Bu olumsuzluğu gidermek amacıyla, yol yapımı için alternatif malzemeler geliştirmeye veya araştırmaya ihtiyaç bulunmaktadır (Gopalakrishnan vd, 2014). Diğer taraftan, tarım, inşaat ve yıkım, endüstriyel ve evsel kaynaklardan büyük miktarda yan ürün meydana gelmektedir. Bu yan ürünler, bu malzemeleri kullanmanın veya geri dönüştürmenin bir yolu bulunmadıkça, atık madde olarak değerlendirilmektedir.

Atık malzemelerin güvenli bir şekilde imha edilmesi karmaşık bir süreç olup; alanın kullanılabilirliği, uzun süreli kirlenmeye karşı dayanıklı depolama tesisinin inşası gibi konuları içermektedir. Atık maddeler; sağlık, çevre ve güvenlikle ilgili problemler açısından sürekli olarak ciddi bir tehdit oluşturmaktadır. Son yıllarda, bu tür malzemelerin, gerekli işlemlerden sonra bina ve karayolu inşaatlarında kullanım için güvenli ve uygun hale getirilip getirilemeyeceğini belirlemeye yönelik araştırmalar yapılmaktadır. Böyle bir yaklaşım atık maddelerle birlikte depolama ve elden çıkarma sorunlarının azaltılmasına, doğal kaynakların verimli kullanılmasına, inşaatlarda enerji tasarrufu sağlamaya, sera gazı emisyonunu azaltmaya, maliyeti düşürmeye, çevreyi korumaya yardımcı olacaktır (Malhotra 2002). Şekil 2.1.'de karayolu sektöründe kullanılabilecek atıklar gösterilmiştir (Gopalakrishnan vd, 2014).



Şekil 2.1. Karayolu sektöründe kullanılabilecek atıkların sınıflandırılması (Gopalakrishnan vd, 2014)

Doğal atık malzemeler piroliz gibi ara işlemlerden geçirildikten sonra bitümün yerine veya bitümle birlikte karayolu üstyapılarında kullanılabilir (Su vd., 2018). Aşağıda son zamanlarda biyoasfaltlar üzerine yapılmış çalışmaların bazılarının özetleri verilmiştir.

Yang ve ekibi yapmış oldukları çalışmada işlenmiş ağaç artıklarının pirolizinden elde ettikleri biyo-y yağların katkı maddesi olarak kullanımının bitümlü sıcak karışımlarda mekanik özelliklerine etkisini araştırmışlardır. Çalışmada ana bağlayıcı olarak PG 58-28 saf bitüm kullanılmıştır. Biyo-y yağlar, işlenmiş ağaç artıklarına uygulanan hızlı piroliz ile elde edilmiştir. Biyo-y yağlar elde edildiği şekilde, içerisindeki su uzaklaştırılarak ve polimer (%4 polietilen) ile birlikte olmak üzere 3 farklı şekilde bitüm modifikasyonunda kullanılmıştır. Her 3 katkı 2 farklı oranda (%5 ve %10) bitüme ilave edilmiştir. Bitümlü bağlayıcı 130°C sıcaklığa, biyo-y yağ katkılar ise 110°C sıcaklığa ısıtılmıştır. Saf bitüm ve biyo-y yağlar 130°C sıcaklıkta 5000 devir/dakika hızla 20 dakika süresince karıştırılmıştır. Agregada olarak kırmataş kalker kullanılmış olup bütün karışımlarda nominal maksimum dane boyutu 12,5 mm olan aynı gradasyon kullanılmıştır. Bütün bitümlü sıcak karışımlar %5,75 bitüm içeriğinde hazırlanmıştır. Karışım numuneleri üzerinde 4 farklı sıcaklık ve 6 farklı frekansta dinamik modül deneyi (E\*) uygulanarak karışımların rijitlikleri belirlenmiştir. Dinamik modül deneyleri sonucunda biyo-y yağ içeren karışımların rijitliklerinin saf karışıma göre %6 ile %10 oranında yüksek olduğu belirlenmiştir. Bu artışın, karışım hazırlanması sırasında biyo-y yağların sıcaklık nedeniyle yaşlanarak sertleşmesinden kaynaklandığı belirtilmiştir. İndirekt çekme dayanım deneyleri sonucunda biyo-y yağ içeren karışımların çekme dayanımı değerlerinin saf karışıma göre daha düşük olduğu belirlenmiştir. Bunun nedeninin biyo-y yağın yaşlanmasından kaynaklandığı belirtilmiş olup ılık asfalt teknolojisinin daha uygun olabileceği belirtilmiştir. Tekerlek izi dayanım deneyleri sonucunda bitüm modifikasyonunda biyo-y yağ kullanılması ile tekerlek oluşumuna karşı direncin azaldığı belirlenmiştir. Dinamik modüldeki artışa rağmen tekerlek izindeki olumsuzluğun tekerlek izi deneyinde hem çekme hem de kayma gerilmeleri olduğundan çekme dayanımındaki azalmadan kaynaklanabileceği belirtilmiştir. Polimer içeren biyo-y yağların diğer biyo-y yağlara göre daha iyi sonuç verdiği gözlenmiştir. Yorulma deneyleri sonucunda biyo-y yağ kullanımının bitümlü sıcak karışımların yorulma ömrünü önemli oranda arttırdığı tespit edilmiştir (Yang vd., 2014).



Korayem ve ekibi çalışmalarında bitüm ve karışım modifikasyonunda amorf karbonu kullanmışlardır. Amorf karbon endüstride herhangi bir kullanım alanı olmayan bir malzeme olup parafin üreten tesislerden atık olarak elde edilmektedir. Çalışmada ana bağlayıcı olarak B 60/70 sınıfı saf bitüm ve agrega olarak kırmataş kalker kullanılmıştır. Amorf karbon, kalker agregaya göre daha yüksek pürüzlülüğe ve yüzey alanına ayrıca hidrofobik yapıya sahip olduğundan agregayla bitüm arasındaki adezyonu ve pürüzlülüğü arttıracakları düşünülmüştür. Amorf karbon 2 farklı oranda (%5 ve %10) bitüme ve 4 farklı oranda (%25, %50, %75 ve %100) filler olarak karışıma ilave edilmiştir. Modifiye bitümler hazırlanırken amorf karbon saf bitüme ilave edilmiş ve 150°C sıcaklıkta 8000 rpm hızda 1 saat süresince karıştırılmıştır. Bitümlü sıcak karışım numunelerinin karışım dizaynı Marshall yöntemine göre yapılmış ve optimum bitüm içerikleri belirlenmiştir. Bağlayıcılar üzerinde konvensiyonel deneyler ve dinamik kayma reometresi deneyleri uygulanmıştır. Karışım numuneleri üzerinde ise dinamik sünme, tekerlek izi, 4 nokta eğilme yorulma deneyleri uygulanmıştır. Bağlayıcı deneyleri sonucunda bitüm modifikasyonunda amorf karbon kullanılması ile bağlayıcıların rijitliklerinin ayrıca yüksek sıcaklıklarda elastikiyetlerinin arttığı belirlenmiştir. Filler olarak amorf karbon kullanılması ile karışımların bitüm ihtiyaçları dolayısıyla optimum bitüm içerikleri azalmıştır. Dinamik sünme deneyleri sonucunda amorf karbonun bitümlü sıcak karışımların kalıcı deformasyon oluşumuna karşı dayanımını arttırdığı tespit edilmiştir. Amorf karbonun bitüm modifikasyonunda kullanılmasının filler olarak kullanılmasına göre daha iyi sonuçlar verdiği belirlenmiştir. Filler olarak %75 ve %100 oranında kullanılması durumunda saf karışıma göre önemli oranda değişiklik olmadığı gözlenmiştir. Tekerlek izi deneyleri sonucunda en iyi sonucu bitüm modifikasyonunda %10 amorf karbon kullanılan karışımın sahip olduğu, en kötü sonuca ise filler olarak %100 amorf karbon kullanılan karışımın sahip olduğu belirlenmiştir. Bitüm modifikasyonunda amorf karbon kullanılmasının düşük şekil değiştirme değerlerinde yorulma ömrünü arttırdığı, %50 filler olarak amorf karbon kullanılmasının olumlu veya olumsuz herhangi bir etkiye neden olmadığı, filler olarak %100 amorf karbon kullanılmasının ise yorulma ömrünü olumsuz yönde etkilediği tespit edilmiştir (Korayem vd., 2018).

Yang ve You, yapmış oldukları çalışmada biyo-yagın bitümlü bağlayıcıların yüksek sıcaklık reolojik özelliklerine etkisini değerlendirmişlerdir. 2014 yılında yapılan çalışmanın devamı niteliğinde olan çalışmada işlenmiş ağaç artıkların pirolizinden elde

ettikleri biyo-yagları kullanmışlardır. Çalışmada ana bağlayıcı olarak PG 58-28 sınıfı saf bitüm kullanılmıştır. Biyo-yaglar, işlenmiş ağaç artıklarına uygulanan hızlı piroliz ile elde edilmiştir. Biyo-yaglar elde edildiği şekilde, içerisindeki su uzaklaştırılarak ve polimer (%4 polietilen) ile birlikte olmak üzere 3 farklı şekilde modifikasyonda kullanılmıştır. Her 3 katkı 2 farklı oranda (%5 ve %10) bitüm modifikasyonunda kullanılmıştır. Bitümlü bağlayıcı 130°C sıcaklığa biyo-yag katkıları ise 110°C sıcaklığa ısıtılmıştır. Saf bitüm ve biyo-yaglar 130°C sıcaklıkta 5000 devir/dakika hızla 20 dakika süresince karıştırılmıştır. Dinamik kayma reometresi (DSR) deneyleri 5 farklı frekansta ve 4 farklı sıcaklıkta uygulanmıştır. Frekans arttıkça kompleks modülü ( $G^*$ ) değerlerinin azaldığı belirlenmiştir. Biyo-yag ilavesi ile bitümün  $G^*$  değerinin arttığı, faz açısı değerinin azaldığı, tekerlek izi dayanım endeksini ( $G^*/\sin \delta$ ) arttığı, dolayısıyla biyo-yagların asfaltın yüksek sıcaklık stabilitesini artırabileceği belirlenmiştir. Çoklu gerilme sünme ve toparlanma (MSCR) testinden biyo-yag ilavesinin kalıcı sünme parametresini ( $J_{nr}$ ) düşürdüğü elastik geri dönüş yüzdesini arttırdığı, bu sonuçlara bağlı olarak yüksek sıcaklık dayanımını ve elastikiyeti arttırdığı tespit edilmiştir. İstatistiksel analizler, elde edilen sonuçların matematiksel olarak anlamlı olduğunu göstermiştir. Bu nedenle, bu çalışmada kullanılan biyo-yagların asfaltın yüksek sıcaklık performansını arttırabileceği sonucuna varılmıştır. Üç biyo-yag türünün etkisi karşılaştırıldığında, DSR ve MSCR testlerinden elde edilen deney sonuçlarının çok tutarlı olmadığı belirlenmiştir. DSR deneyleri sonucunda normal biyo-yagın suyu alınmış ve polimer katkılı biyo-yaga göre etkisinin daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Bu durum, normal biyo-yagın içerisindeki su içeriğinin fazla olmasından kaynaklanmıştır. MSCR deneyinde polimer içeren biyo-yagla hazırlanan modifiye bitümler diğer iki biyo-yaga göre daha düşük sonuçlar vermiştir. Bu tutarsız sonuçların olası bir nedeninin, farklı yükleme seviyeleri ve yükleme modları olduğu, çünkü DSR deneyindeki gerilmelerin MSCR deneyinden çok daha düşük olduğu belirtilmiştir. Ayrıca, polimer içeren biyo-yag modifiyeli bitümün polimer içeriğinin oldukça düşük olması (ağırlıkça % 0,4), performansının düşük olmasının nedeni olarak ifade edilmiştir (Yang ve You, 2015)

Zhao ve ekibi, yapmış oldukları çalışmada biyo-yagın yan ürünü olan biyoçarın asfalt çimentosunda katkı maddesi olarak kullanımının etkisini araştırmışlardır. Çalışmada ana bağlayıcı olarak PG 64-22 sınıfı bitüm kullanılmıştır. Dallı darı bitkisinin pirolizinden elde edilen biyoçar bitüm modifikasyonunda kullanılmıştır. Dallı darı bitkisine oksijensiz ortamda dakikada 15°C sıcaklık artışı uygulanmış hedef

sıcaklığa (400 veya 500°C) ulaşıldıktan sonra 90 dakika bekletilmiştir. Reaksiyon sonucunda katı materyaller biyoçar olarak elde edilmiştir. Saf bitüm 165°C sıcaklığa getirilmiş, biyoçar ise 2 saat süresince 120°C sıcaklıkta bekletilmiştir. Homojen yapı elde edilinceye kadar yüksek devirli karıştırıcıda bitüm ve biyoçar karıştırılmış ve bozulma meydana gelmemesi için -10°C sıcaklıkta bekletilmiştir. Biyoçarın mikroskopik incelenmesi sonucu düzensiz fiber yapısında olduğu ve poroz özellik taşıdığı belirlenmiştir. Bu poroz ve fiber yapının güçlü bitüm-biyoçar yapısı sağlayacağı böylece modifiye bağlayıcıların performansını olumlu etkiyeceği belirtilmiştir. DSR deneyleri sonucunda biyoçarın özellikle yüksek sıcaklıklarda ve düşük frekanslarda bitümün özelliğini önemli oranda iyileştirdiği belirlenmiştir. Bunun nedeninin biyoçar sayesinde hacimsel etkileşimin oluşması ve fiziko-kimyasal değişim olduğu ifade edilmiştir. Katkı içeriği arttıkça bu yapının güçleneceği, biyoçarın poroz ve lifsi yapısının bu etkinin artmasına neden olduğu belirtilmiştir. Düşük sıcaklık özelliklerine bakıldığında, biyoçar rijitliği arttırdığından düşük sıcaklıkta çatlama olasılığını arttırabileceği ifade edilmiştir. Ayrıca biyoçarın yaşlanma etkisini azaltabileceği belirlenmiştir. Tekerlek izi parametresi değerlerinden biyoçar modifikasyonunun kalıcı deformasyon oluşumuna karşı dayanımı önemli oranda arttırdığı tespit edilmiştir. Bütün bağlayıcıların yorulma çatlağı parametresini sağladığı, özellikle düşük katkı içeriğinde bu etkinin daha belirgin olduğu vurgulanmıştır. Düktilite indeksinden ( $G'/(η'/G')$ ) özellikle düşük katkı içeriklerinde saf bağlayıcı ile biyoçar modifiyeli bağlayıcı arasında önemli bir fark olmadığı belirlenmiştir. Bütün deney sonuçlarından biyoçarın bitümlerin reolojik özelliklerini önemli oranda iyileştirdiği, yüksek sıcaklık dayanımına büyük bir olumlu etkisi olduğu, düşük sıcaklık dayanımını ise düşük oranda etkilediği belirtilerek sıcaklık hassasiyetini azalttığı belirtilmiştir (Zhao vd., 2014).

Lei ve ekibi, biyo-yağın atık kauçuk modifiyeli bitümlü bağlayıcıların yüksek sıcaklık özelliklerine etkisini araştırmışlardır. Atık kauçuk eskimiş araç tekerleklerinden elde edilmiş olup iki farklı boyutta (20 meş ve 80 meş) kullanılmıştır. Atık kauçuk/bitüm oranı sabit olarak %20 alınmıştır. Biyo-yağlar mısır atıklarından hızlı piroliz ile elde edilmiş ve 3 farklı oranda (%5, %10 ve %15) bitüme ilave edilmiştir. Bütün modifiye bitümlerin viskozite analizleri yapılmıştır. Ayrıca bağlayıcıların yüksek sıcaklık özellikleri dinamik mekanik analiz ile tespit edilmiştir. Saf bağlayıcı olarak 80/100 penetrasyonlu bitüm kullanılmıştır. Saf bitüm ve atık kauçuk 170°C sıcaklıkta 30 dakika süresince karıştırılmış, ardından belirlenen oranlarda biyo-yağ ilave edilerek

aynı şartlarda yeniden karıştırılmıştır. Viskozite deneyleri sonucunda %10 biyo-yag içeriğine kadar viskozite değerlerinin arttığı, %15 biyo-yag içeriğinde ise dñnel viskozite değerlerinin azaldığı tespit edilmiştir. Atık lastiğin boyutu kũçũldũkũe modifikasyonun daha etkin olduğu, viskozite değerlerinin arttığı belirlenmiştir. DSR deneylerinden elde edilen tekerlek izi parametreleri incelendiğinde bũtũn katkılarının tekerlek izi parametrelerini arttırdığı, kısa dñnem yaşlanmadan ÷nce biyo-yag içermeyen atık lastik modifiyeli bitũmlerin en yũksek değere sahip olduğu gñzlenmiřtir. Kısa dñnem yaşlanmadan sonra ise en yũksek değere atık lastiğe %15 biyo-yag ilave edilen modifiye bitũmlerin sahip olduğu tespit edilmiştir. Bu durum, biyo-yagın bitũmlũ bağlayıcıların yaşlanmasını arttırdığını dolayısıyla olumsuz etkilediğini gñstermektedir. Biyo-yag içeriği arttıķa kalıcı modũl değerinin arttığı belirlenmiştir. MSCR deneyleri sonucunda dũřuk boyutlu (20 meş) atık lastik kullanılması durumunda elastik geri dñnmenin daha yũksek olduğu belirlenmiştir. Elde edilen sonuēlar, atık kauēuk ile birlikte biyo-yagın birlikte kullanılmasının bitũmlũ bağlayıcıların yorulma dayanımlarını da olumlu etkileyeceğini gñstermiřtir. Sonuē olarak biyo-yagın atık lastik ile birlikte bitũm modifikasyonunda kullanılmasının karayolu ũstyapıları iēin fayda sağlayacağı belirtilmiştir (Lei vd., 2018).

Gao ve ekibi yapmış oldukları ēalıřmada biyo-yaglarla modifiye edilmiş bitũmlerin reolojik ÷zelliklerini zaman ve frekansa bağlı olarak araştırmışlardır. Saf bağlayıcı olarak 50 penetrasyonlu saf bitũm kullanılmıştır. Saf bitũme %1 oranında SBS ilave edilmiştir. Biyo-yag, testere artığı biyokũtlelerin pirolizinden elde edilmiştir. ÷nce saf bitũm ve SBS 15 dakika sũresince 180°C sıcaklıkta 3000 devir/dakika hızda karıştırılmıştır. Biyo-yag içeriği %5, %10, %15 ve %20 olarak belirlenmiştir. Belirlenen oranda biyo-yag SBS/bitũm karışımına ilave edilmiş 20 dakika sũresince 3000 devir/dakika hızda karıştırılmıştır. Biyo-yagın SBS/bitũm ile karıştırma sıcaklığı biyo-yagda yaşlanma meydana gelmemesi iēin 140°C olarak seēilmiřtir. Modifiye bitũmler kısa sũreli yaşlandırılmış, orijinal ve kısa sũreli yaşlandırılmış bağlayıcılar DSR deneylerine tabi tutulmuştur. Kısa sũreli yaşlanma ÷ncesinde en yũksek kompleks modũl değerine %1 SBS modifiyeli bitũmũn sahip olduğu, kısa sũreli yaşlanma sonrasında ise %1 SBS ve %20 biyo-yag modifiyeli bitũmũn sahip olduğu tespit edilmiştir. Bu durum, kısa sũreli yaşlanma nedeniyle biyo-yagda meydana gelen yaşlanmadan kaynaklanmıştır. %15 biyo-yag iēeren modifiye bitũmũn viskozitesinin diğer bağlayıcılardan daha dũřuk olduğu tespit edilmiştir. Kısa sũreli yaşlanma

sonrasında, biyo-yağ içeriği arttıkça kayıp modül ve kompleks modül değerleri artmıştır. Bu durum, kısa süreli yaşlanma sonrasında bağlayıcıların deformasyon oluşumuna karşı dayanımının arttığını göstermektedir (Gao vd., 2018).

Tahami ve diğerleri, iki farklı biyokütle külünün bitümlü sıcak karışımlarda filler olarak kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Her yıl yüzlerce milyon ton pirinç ve hurma tüketilmekte, bunun sonucunda önemli oranda artık meydana gelmektedir. Bu artıkların yakılması ve araziye doldurulması en yaygın yok edilme yöntemidir. Bu malzemelerin asfalt karışımlarda kullanılması, çevresel olarak atıkların yok edilmesi ve faydalanılması açısından önemlidir. Bu çalışmada filler olarak %25, %50, %75 ve %100 oranlarında bu küller kullanılmıştır. Çalışmada ana bağlayıcı olarak 60/70 penetrasyonlu bitüm ve agraga olarak kırmataş kalker kullanılmıştır. Hurma çekirdeği ve çeltik artığı 650°C sıcaklıkta 2 saat yakılmıştır. Kül, 15 dakika süresince değirmenden geçirilmiş ve 200 nolu elekten elenmiştir. Mikroskopik inceleme sonrasında külün kırmataş fillere göre daha pürüzlü ve poroz olduğu belirlenmiştir. Saf karışımın tasarımı Marshall yöntemine göre yapılmış ve optimum bitüm içeriği %5,6 olarak belirlenmiştir. Diğer karışımlarda aynı bitüm içeriğinde hazırlanmıştır. Mastik hazırlanmasında filler/bağlayıcı oranı 0,9 olarak seçilmiştir. Marshall stabilite ve akma deneyleri sonucunda filler olarak kullanılan kül içeriği arttıkça stabilite değerlerinin düzenli olarak arttığı belirlenmiştir. Marshall oranı değerlerinden de filler olarak kül kullanılması ile bu değerlerin arttığı belirlenmiştir. İndirekt çekme rijitlik modülü değerleri stabilite ve Marshall oranı değerleri ile benzerlik göstermiş, filler olarak kül kullanılması ile ritijliğin her 3 sıcaklıkta da arttığı tespit edilmiştir. Tekerlek izi deneyleri sonucunda filler olarak kullanılan kül içeriği arttıkça tekerlek izi oluşumunun azaldığı tespit edilmiştir. En yüksek dayanıma filler olarak tamamen kül kullanılan karışımların sahip olduğu belirlenmiştir. İndirekt çekme yorulma deneyleri sonucunda da filler olarak kullanılan kül içeriği arttıkça karışımların yorulma ömürlerinin arttığı gözlenmiştir (Tahami vd., 2018).

Arabani ve Tahami, yapmış oldukları çalışmada pirinç kabuğu küllerinin (RHA) bitümlü sıcak karışımların mekanik özelliklerine etkisini incelemişlerdir. Pirinç kabuğu külleri 650°C sıcaklıkta fırında pirinç kabuğunun 2 saat süresince yakılması sonrası elde edilmiştir. Kül, 15 dakika boyunca bir bilyalı değirmende öğütülmüş ve daha sonra 200 nolu elekten (0.075 mm) elenmiştir. Yanma şartları (süre ve sıcaklık gibi), pirinç kabuğu külünün özgün yüzey alanını etkilediğinden yanma sıcaklığı en ideal değer olan

500-700°C aralığında seçilmiştir. RHA, saf bitüme 160°C sıcaklıkta ilave edilmiş ve RHA bitümle 2500 rpm hızda 30 dakika süresince homojenlik elde edilinceye kadar karıştırılmıştır. RHA saf bitüme 4 farklı oranda (%5, %10, %15 ve %20) ilave edilmiştir. Saf bitümle hazırlanan karışımın optimum bitüm içeriği Marshall yöntemine göre %5,6 olarak bulunmuştur. Modifiye bitümlerle hazırlanan karışımlarda aynı bitüm içeriğinde hazırlanmıştır. Bağlayıcı deney sonuçlarından RHA kullanımı ile bitümün penetrasyon ve düktilite değerlerinin azaldığı, yumuşama noktası, viskozite ve penetrasyon indeksi değerlerinin arttığı belirlenmiştir. DSR deney sonuçlarından RHA içeriğinin artması ile kompleks modül değerleri artarken faz açısı değerlerinin azaldığı tespit edilmiştir. Bağlayıcı deney sonuçlarından RHA kullanılması ile bitümün rijitliğinin ve yüksek sıcaklık dayanımının arttığı, termal hassasiyetinin azaldığı belirlenmiştir. Marshall stabilite ve akma deneylerinden RHA içeriğinin artması ile karışımların stabilite ve Marshall oranı değerlerinin arttığı belirlenmiştir. 3 farklı sıcaklıkta yapılan indirekt çekme rijitlik modülü deneyleri sonucunda her üç sıcaklıkta da RHA kullanımı ile bitümlü sıcak karışımların rijitlik modüllerinin arttığı tespit edilmiştir. Dinamik sünme deneyleri sonucunda bitüm modifikasyonundaki RHA içeriği arttıkça kalıcı deformasyon miktarının azaldığı, dolayısıyla RHA kullanımının kalıcı deformasyon oluşumuna karşı dayanımı arttırdığı tespit edilmiştir. Ayrıca uygulanan gerilmenin artması ile kalıcı deformasyon miktarının arttığı tespit edilmiştir. İndirekt çekme yorulma deneyleri sonucunda RHA kullanımı ile bitümlü sıcak karışımların tekrarlı yükleme sonucu oluşan yorulma çatlak oluşumuna karşı dayanımının önemli oranda arttığı belirlenmiştir (Arabani ve Tahami, 2017).

Çeloğlu ve diğerleri, yapmış oldukları çalışmada farklı biyokütlelerden elde ettikleri biyoçarların bitümlü bağlayıcıların yüksek sıcaklık reolojik özelliklerine etkisini incelemişlerdir. Çalışmada ana bağlayıcı olarak TÜPRAŞ rafinerisinden elde edilen B 160/220 sınıfı bitüm kullanılmıştır. Ceviz ve kayısı çekirdeği kabuğu öğütülerek 200 nolu elekten elenmiştir. Biokütleler 900±50°C sıcaklıktaki kül fırınında 7 dakika bekletilerek piroliz işlemine tabi tutulmuştur. Elde edilen biyoçarlar 3 farklı oranda (%5, %10 ve %15) bitüme ilave edilmiştir. Saf bitüm ve biyoçar 180°C sıcaklıkta 1000 rpm hızda 1 saat süresince karıştırılmıştır. Saf ve modifiye bitümler üzerinde uygulanan penetrasyon deneyleri sonucunda biyoçar içeriği arttıkça penetrasyon değerlerinin azaldığı belirlenmiştir. Yumuşama noktası deneyleri sonucunda biyoçar içeriği arttıkça yumuşama noktası değerlerinin arttığı, ceviz kabuğundan elde edilen biyoçarın en etkin

katkı olduğu tespit edilmiştir. Viskozite değerleri sonucunda katkı içeriği arttıkça viskozite değerlerinin arttığı, dolayısıyla bağlayıcıların kıvamının yükseldiğı tespit edilmiştir. DSR deneyleri sonucunda bitüm modifikasyonunda biyoçar kullanılması ile bağlayıcıların tekerlek izi oluşumuna karşı dayanımlarının önemli oranda yükseldiğı belirlenmiştir (Çeloğlu vd., 2016).

Bostancıoğlu yapmış olduğu çalışmada fındık kabuğundan elde edilen aktif karbon ve furan reçinesini farklı oran, boyut ve karıştırma sıcaklıklarında karıştırarak katkı malzemesi elde etmiştir. Bitümlü sıcak karışımlarda kullanılan katkı malzemesinin tekerlek izine karşı direnci ve tekrarlı yükler altında yorulma dayanımını arttırmasına rağmen nem hasarına karşı dayanımı olumsuz etkilediğı belirlenmiştir (Bostancıoğlu, 2012).

Yılmaz, tez çalışmasında bor içerikli organik katkı malzemesini laboratuvar ortamında sentezlemiş, bu katkı malzemesi ile bitümlü sıcak karışımlar hazırlamış, elde ettiğı numuneler üzerinde bağlayıcı ve bitümlü sıcak karışım deneyleri uygulamıştır. Deney sonuçlarından katkının asfaltın kıvamını, tekerlek izi ve yaşlanma direncini, esneklik ve adezyon özelliğini, yük yayma kabiliyetini ve yorulma dayanımını arttırdığı belirlenmiştir. Kullanılan katkının sıcaklık hassasiyetini ve düşük sıcaklıklardaki çatlama eğilimini azalttığı tespit edilmiştir (Yılmaz, 2016).

Yapılan çalışmalar sonucunda tarımsal atıkların piroliz işleminden geçirildikten sonra asfalt katkı maddesi olarak kullanılabileceğini göstermektedir. Bu tez çalışmasında, tarımsal artıklar olan cibre ve şlempeden elde edilen aktif karbonun bitüm modifikasyonunda kullanılmasının bitümün reolojik davranışına ve bitümlü sıcak karışımların mekanik özelliklerine etkisi belirlenmeye çalışılmıştır.

### 3. DENEY YÖNTEMLERİ

#### 3.1. Bağlayıcı Deneyleri

##### 3.1.1. Penetrasyon Deneyi

Penetrasyon deneyi bağlayıcıların kıvam veya sertliğini belirlemek amacıyla TS EN 1426 standardına göre yapılmaktadır. Bu deney ile asfaltın kıvamı saptandığı gibi aynı zamanda asfaltın sınıfı da belirlenir.

Standart penetrasyon deneyinde toplam 100 gr'lık yük 25°C sıcaklıktaki bağlayıcıya 5 saniye boyunca bırakılır, batma miktarı penetrasyonu verir. Penetrasyon birimi 0,01 cm'dir. Penetrasyon cihazı ve kabı Şekil 3.1'de verilmiştir.



Şekil 3.1. Penetrasyon cihazı ve kabı

Deney için önce bağlayıcı etüvde ısıtılır ve içinde hava boşluğu kalmayacak şekilde karıştırıldıktan sonra penetrasyon kabına aktarılır. 21-30°C olan oda sıcaklığında 1-1,5 saat soğuduktan sonra numune 25 sıcaklıkta olan su banyosuna yerleştirilir ve burada da 1-1,5 saat bekletilir. Daha sonra cihaza alınan numuneye iğne yüzeye değecek ama batmayacak şekilde yerleştirilir ve deney başlatılır.

En az 3 okuma yapılır ve bu değerlerin aritmetik ortalaması penetrasyon değerini verir. Deneyin kabul edilebilmesi için okumalar arasında kabul edilen en büyük farklar Tablo 3.1'de verilmiştir.



**Tablo 3.1.** Penetrasyon okumasında kabul edilebilen en büyük farklar

| Penetrasyon değeri      | $\leq 49$ | 50-149 | 150-249 | $\geq 250$ |
|-------------------------|-----------|--------|---------|------------|
| Maks. Penetrasyon farkı | 2         | 4      | 6       | 8          |

### 3.1.2. Yumuşama Noktası Deneyi

TS EN 1427 standardına uygun olarak yapılan yumuşama noktası deneyi, bitümlü bağlayıcıların yüksek sıcaklık dayanımlarını ölçmek için yapılır. Deneyde, Şekil 3.2’de görülen cihaz kullanılmaktadır. Şekil 3.3’te gösterildiği gibi içinde bitüm bulunan pirinç halka sehpa üzerine koyularak su banyosuna alınır. Su banyosunun sıcaklığı belirli bir hızda artmaya başlar. Bitüm üzerinde bulunan bilyenin ve sıcaklığın etkisiyle yumuşar. Bilye tabana değdiği anda cihazdan okunan sıcaklık yumuşama noktası değerini verir.



**Şekil 3.2.** Yumuşama noktası cihazı



**Şekil 3.3.** Pirinç halka ve halkaların konulduğu sehpa

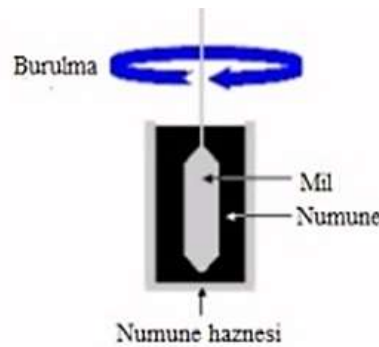
### 3.1.3. Dönel Viskozimetre Deneyi (RV)

ASTM D 4402 standardına uygun olarak yapılan deney, bitümlü bağlayıcıların yüksek sıcaklıklardaki akışkanlık özelliklerini belirlemek için yapılır. Şekil 3.4'te düzeneği verilen deney, yaşlandırılmamış saf ve modifiye bitümlere uygulanmaktadır. Bağlayıcıların karıştırma ve sıkıştırma sıcaklık aralıklarının tespitinde kullanılır.



Şekil 3.4. Dönel viskozimetre cihazı

Deneyde bağlayıcı içinde 20 devir/dk hızla dönen silindirik milin karşılaştığı direnç ile viskozite değeri elde edilir, birimi cP cinsinden ölçülür ( $1000 \text{ cP} = 1 \text{ Pa.s}$ ).  $135^\circ\text{C}$  ve  $165^\circ\text{C}$  sıcaklıklarda RV deneyi uygulanmaktadır. Deney şeması Şekil 3.5'te verilmiştir.



Şekil 3.5. Dönel viskozimetre deney şeması

### 3.1.4. Dönel İnce Film Etüvü Deneyi (RTFOT)

Dönel İnce Film Etüvü Deneyi (RTFOT) ile sıcaklık ve havanın etkisiyle asfalt bağlayıcının karıştırma ve yapım aşamalarında meydana gelen uçucu madde kaybının tespiti ve deneyden sonra yaşlanmış numunenin fiziksel özelliklerinin belirlenmesi için yapılır (Zaniewski ve Pumphrey, 2004; Tunç, 2001; Kennedy vd., 1994).

Şekil 3.6’da görüldüğü gibi, deneyde 8 adet şişenin içine  $35 \pm 0,5$  gr bağlayıcı koyularak cihaza yerleştirilir ve 15 devir/dakika hızda 85 dakika süreyle döndürülür. Bu sırada hava üfleyici şişelere hava püskürtülür. Dönme hareketi, hava üfleme ve sıcaklığın etkisi ile asfalt bağlayıcı şişenin içerisini tam olarak kaplayarak ince bir film tabakası oluşturur ve bu sayede bağlayıcının yaşlanması sağlanır.



Şekil 3.6. RTFOT deney cihazı ve şişeleri

Deneyden sonra, daha önce işaretlenen ve ağırlıkları bilinen iki şişe kütle kaybının hesabı için tartılır. Diğer 6 şişedeki numune bir kaba alınarak PAV ve DSR deneylerinde kullanılmak üzere uygun bir şekilde saklanır.

Kütle kaybı aşağıdaki bağıntı ile hesaplanır (Altaş, 2002; Tunç, 2001; Dinç, 1999; Zaniewski ve Pumphrey, 2004; Warren vd., 1994).

$$\text{Kütle Kaybı, \%} = [(\text{İlk Kütle} - \text{Son Kütle}) / \text{İlk Kütle}] \times 100 \quad (3.1)$$

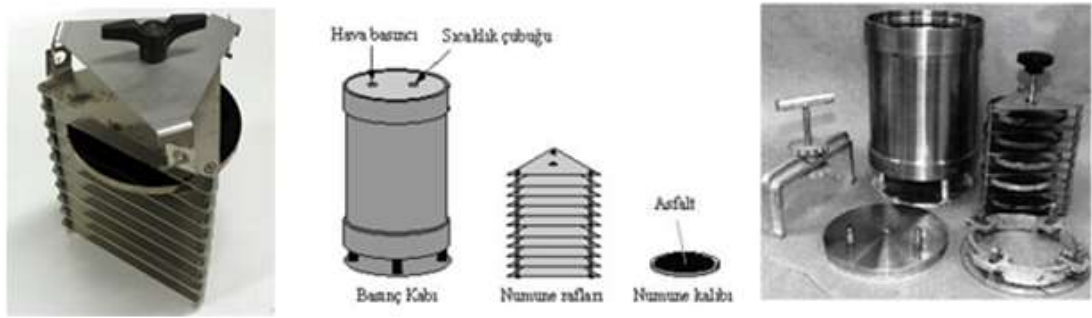
### 3.1.5. Basıncılı Yaşlandırma Kabı Deneyi (PAV)

Basıncılı Yaşlandırma Kabı (PAV) yöntemi, bitümlü sıcak kaplamanın ilk 5-10 yılı boyunca bitümde meydana gelen oksidasyon yaşlanmasını laboratuvarında tespit

edebilmek için SHRP (Stratejik Karayolu Araştırma Programı) tarafından geliştirilmiştir (Kennedy, 1994; Zaniwski ve Pumphrey, 2004; Christensen ve Anderson, 1992).

Deneyde RTFOT deneyinden elde edilen yaşlandırılmış numuneler kullanılmaktadır. Asfalt numunesi basınçlı kaba koyularak sabit sıcaklıkta 20 saat bırakılır. Böylece kaplamanın karıştırma, yapım ve hizmet sırasında karşılaşacağı çevresel koşullar deneylere yansıtılmış olmaktadır (Altaş, 2002; Tunç, 2001; Öztürk ve Çubuk, 2004).

Deney içerisinde rafları bulunan basınçlı yaşlandırma kabı ve düzeneklerinden meydana gelir. Basınçlı Yaşlandırma Kabı (PAV) ve parçaları Şekil 3.7.'de verilmiştir.



Şekil 3.7. PAV deney aleti ve parçaları

Deneyden önce numune akıcı bir hale gelinceye kadar ve basınçlı kap istenilen sıcaklıkta (90, 100 veya 110°C) ısıtılır. Basınçlı kap,  $2,1 \pm 0,1$  MPa ( $305 \pm 15$  psi) sabit hava basıncı ve kullanılacak bağlayıcı sınıfına bağlı olarak farklı test sıcaklığı şartlarında çalışacak şekilde tasarlanmıştır ve içerisinde 10 adet numune kalıbı bulunmaktadır. Numune kaplarına  $50 \pm 0,5$  gr bağlayıcı konur ve raflarına yerleştirilir. Raflı taşıyıcı, basınçlı kaba yerleştirilerek kapak kapatılır. Kabın sıcaklığı test sıcaklığına  $\pm 2^\circ\text{C}$  yaklaştığında 20 saat  $\pm 10$  dakika süreyle yaşlandırma işlemi gerçekleştirilir.

Deney sonrasında kaptaki basınç, asfaltta köpürmeye neden olmaması için  $9 \pm 1$  dakika sürecek şekilde yavaşça boşaltılır (Yamaç, 2015). Bu işlemden sonra asfalt numuneler kaptan çıkartılır ve içinde sıkışan havanın uzaklaştırılması için  $163^\circ\text{C}$ 'de 30 dakika etüvde tutulur (Zaniwski ve Pumphrey, 2004; Loh ve Olek, 1999; Warren vd., 1994; Petersen vd., 1994).

**Tablo 3.2.** Bağlayıcı sınıfına göre uygulanacak PAV deney sıcaklıkları (Zaniewski ve Pumphrey, 2004; McGennis vd., 1994)

| Bağlayıcı Sınıfları | PAV Deney Sıcaklığı (°C) |
|---------------------|--------------------------|
| PG 46-Y             | 90                       |
| PG 52-Y             | 90                       |
| PG 58-Y             | 100                      |
| PG 64-Y             | 100                      |
| PG 70-Y             | 100-110                  |
| PG 76-Y             | 100-110                  |
| PG 82-Y             | 100-100                  |

### 3.1.6. Dinamik Kayma Reometresi Deneyi (DSR)

ASTM D 7552 standardına göre yapılan deney, bağlayıcıların tekerlek izi dayanım ve yorulma parametrelerinin belirlenmesi için yapılır. Bağlayıcıların tekerlek izi dayanım parametresini belirlemek için işlem görmemiş veya RTFOT yöntemiyle yaşlandırılan bağlayıcılar kullanılırken, yorulma parametrelerinin belirlenmesinde PAV ile yaşlandırılmış bağlayıcılar kullanılmaktadır. DSR cihazı Şekil 3.8’de verilmiştir.

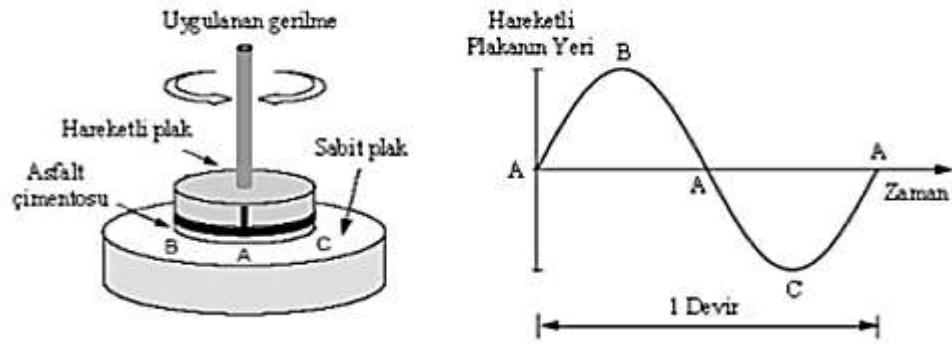


**Şekil 3.8.** DSR deney cihazı

Asfalt çimentosunun viskoelastik özelliğinden dolayı yük altında meydana gelen deformasyonun bir kısmı geri dönerken, bir kısmı kalıcı olmaktadır. Uygulanan kayma

gerilmesi, oluşan kayma deformasyonu ve faz açısı kullanılarak bağlayıcıların viskoelastik yapısı değerlendirilmektedir.

Şekil 3.9’da deneyin çalışma prensibi gösterilmiştir. Numune sabit alt plak ve hareketli üst plak arasına yerleştirilir. Hareketli üst plak A noktasından B noktasına sonra A noktasından geçerek C noktasına gitmektedir. Daha sonrada tekrar A noktasına ulaşmaktadır. Buna bir devir denir ve deney 10 devirden oluşur. Bir devirin dönme hızına frekans denir ve deneyin dönme frekansı yaklaşık 10 radyan/saniye’dir (1,59 devir/saniye).



Şekil 3.9. DSR deneyi çalışma şekli

Kayma gerilmeleri ve oluşan deformasyonlar kullanılarak kompleks kayma modülü ( $G^*$ ) ve faz açısı ( $\delta$ ) belirlenmektedir.  $G^*$ , tekerrür eden kayma gerilmelerinin oluşturduğu deformasyonlara karşı bitümün gösterdiği toplam direncin göstergesidir (Yamaç, 2015). Kompleks kayma modülü ve faz açısı, bitümlü sıcak kaplamaların tekerlek izi oluşumunu ve yorulma ömrü potansiyelini belirlemeye yardımcı olmaktadır (Zaniewski ve Pumphrey, 2004; Petersen vd., 1994).

Bitümlü bağlayıcılar viskoelastik özellik gösterdiğinden normal şartlarda faz açısı 0 ile 90° arasında değişmektedir. Faz açısının düşük olması bağlayıcının daha fazla elastik özellik gösterdiğini ifade etmektedir. Faz açısının 0° olması numunenin tamamen elastik davranış gösterdiğini, 90° olması tamamen viskoz davranış gösterdiğini ifade etmektedir.

### 3.1.7. Kiriş Eğme Reometresi (BBR) Deneyi

Soğuk bölgelerde inşa edilen esnek kaplamalarda iklim ve çevre şartlarından kaynaklanan termal çatlak adı verilen düşük sıcaklık çatlakları oluşur. Asfalt

bağlayıcının düşük sıcaklıklarda rijit özellik göstermesi kaplamanın da rijit davranmasına neden olur, bu durum termal çatlak riskini artırır. Bu nedenle BBR deneyi bitümün düşük sıcaklıklardaki davranışını belirlemek amacıyla yapılır. BBR basit olarak bağlayıcının belirli bir sıcaklıkta ve sabit bir yük altında ne kadar sünme veya defleksiyona maruz kaldığını gösterir.

Deney RTFOT ve PAV ile yaşlandırılmış bağlayıcılar üzerinde de yapılabildiğinden, bağlayıcının zaman içindeki değişimi de saptanabilmektedir (Geçkil, 2008).

Şekil 3.10'da BBR numuneleri ve deney düzeneği görülmektedir. Bağlayıcı kalıplara taşacak şekilde dökülür ve soğumaya bırakılır. Daha sonra bıçak yardımıyla fazlalıklar alınır. Buradaki amaç boşluk kalmadan istenilen boyutlarda numune elde etmektir.



Şekil 3.10. BBR numuneleri ve deney düzeneği

Deneyde,  $12,5 \times 12,5 \times 6,5$  mm standart ölçülerinde olan asfalt kırıntısına  $100 \pm 5$  gr ( $980 \pm 5$  mN) olan bir tekil kuvvet 240 saniye boyunca uygulanmaktadır. Çubuğun ortasında oluşan sünme farklı sürelerde (8, 15, 30, 60, 120, 240 sn) sistem tarafından ölçülür, sünme sertliği (S) ve sünme oranı (m-değer) hesaplanır. Sünme sertliği asfaltın sünme gerilmelerine karşı gösterdiği direnç, sünme oranı ise yükleme süresince asfaltın sertliğindeki değişim olarak değerlendirilir. Superpave şartnamesine göre 60 saniye yükleme süresi için sünme oranı değerinin en az 0,3 ve rijitliğinin en fazla 300 MPa olması istenmektedir (McGennis vd., 1994; Petersen vd., 1994).

### 3.2. Bitümlü Sıcak Karışım Deneyleri

#### 3.2.1.Marshall Stabilite ve Akma Deneyi

TS EN 12697-34 standardına göre yapılan Marshall stabilite ve akma deneyi, bitümlü sıcak karışım (BSK) numunelerinin maksimum dayanımı (stabiliteyi) ve maksimum yük esnasında oluşan deformasyonu (akmayı) tespit etmek için yapılır. Deney düzeneği Şekil 3.11'deki gibidir.



Şekil 3.11. Marshall stabilite ve akma aleti

Deneye başlamadan soğumuş BSK numunelerinin yükseklikleri ölçülür. Daha sonra numuneler  $60\pm1^{\circ}\text{C}$  sıcaklıktaki su banyosunda 40-60 dakika bekletilir. Bu işlemden sonra numune cihaza yerleştirilir ve numuneye  $50\pm2$  mm/dk hızla yükleme yapılır. Maksimum yük ve bu yükte oluşan deformasyon değerleri kaydedilir. Deney için standart numune yüksekliği 63,5 mm olup, farklı yüksekliğe sahip numuneler için stabilite düzeltme katsayıları kullanılmakta ve aşağıdaki bağlantı yardımıyla bulunmaktadır.

$$c = 5,24 \times e^{(-0,0258 \times h)} \quad (3.2)$$

Burada c düzeltme katsayısı, h ise numune yüksekliğidir. Deney sonunda elde edilen stabilite ve akma değerlerinin ortalaması alınır ve stabilite için %15, akma için %20 farklı değere sahip olan numuneler değerlendirmeden çıkarılır. Daha sonra geri kalan



numuneler için bir daha ortalama alınarak stabilite ve akma değerlerinin ortalaması belirlenir ve eğer yine aynı sapma oranına sahip numuneler varsa bu numune serisi iptal edilerek yeni numunelerle deney tekrarlanır.

Marshall stabilite değerinin akma değerine bölünmesiyle Marshall oranı (MQ) belirlenir ve bu değer karışımın sertliğinin ve BSK'nın deformasyona karşı direncinin bir göstergesidir (Zoorob ve Suparma, 2000; Hınısoğlu ve Ağar, 2004; Çolak, 2006; Yılmaz ve Kök, 2008).

BSK'ların nem hasarına karşı dayanımını tespit etmek için "Kalıcı Marshall Stabilitesi" deneyi uygulanır ve bu değer yüksek çıkması numunenin nem hasarına karşı dayanımının yüksek olduğunun bir göstergesidir. Benzer şekilde 24 saat  $60\pm1^{\circ}\text{C}$  sıcaklıkta su banyosunda bekletilen numuneler, Marshall deneyine tabi tutulmaktadır. Elde edilen stabilite değerlerinin normal stabilite değerine oranı kalıcı Marshall stabilitesi değeridir.

### 3.2.2. İndirekt Çekme Rijitlik Modülü Deneyi

Bitümlü tabakaların yük dağıtma kabiliyetinin bir ölçüsü olan rijitlik modülü, BSK'ların en önemli performans özelliklerinden biridir. BS DD 213 standardı ile tanımlanır ve UMATTA (Universal Material Testing Apparatus) deney aleti kullanılarak yapılmaktadır. Hasar oluşturmaz, deformasyon kontrollü bir deneydir. Şekil 3.12'de deney düzeneği verilmiştir.



Şekil 3.12. İklimlendirme kabini ve indirekt çekme rijitlik modülü deney düzeneği

İndirekt çekme rijitlik modülü deneyi (ITSM) için önce numuneler iklimlendirme kabinine alınır ve burada en az 3 saat boyunca deney sıcaklığında bekletilir. Standart

deney sıcaklığı 20°C'dir ama aynı zamanda kabinin özelliği sayesinde deney farklı sıcaklıklarda da yapılabilir. Yazılıma, numunenin çapı ve yüksekliği, tahmini poisson oranı, yükün etki süresi gibi değerler önceden girilir. Daha sonra numune yükleme çerçevesine yerleştirilerek yatay deformasyonu ölçen sensörler ayarlanır ve deney başlatılır. Önce numuneye ön yükleme işlemi ile uygulanacak yük belirlenir, belirlenen yük 5 defa numuneye uygulanır. Sonrasında bu değerler kullanılarak ITSM değeri belirlenir.

$$S_m = \frac{F(R+0,27)}{LH} \quad (3.3)$$

$S_m$  : İndirekt çekme rijitlik modülü (MPa)

$F$  : maksimum dikey yük (N)

$R$  : Poisson oranı

$L$  : ortalama numune yüksekliği (mm)

$H$  : 5 yük tekrarı sonucu oluşan ortalama yatay deformasyon (mm)

Deney daha sonra aynı numunenin 90°C döndürülerek diğer yüzünde yapılmaktadır. Elde edilen iki değer ortalama alınarak numunenin ITSM değeri belirlenir. Eğer değerler arasında %10'dan fazla sapma varsa deney tekrarlanır.

### 3.2.3. Nem Hasarına Karşı Dayanım Deneyi

Bitüm ile agrega arasındaki adezyon, uzun vadede kaplamanın performansının yüksek olmasını sağlayan en önemli parametrelerden biridir. Eğer su, bitüm ile agrega arasına girerse, aralarındaki adezyon azalır ve bu durum BSK kaplamalarında erken bozulmalara neden olmaktadır. Bitümlü sıcak karışımların nem hasarına karşı dayanımı; bitüm ve agreganın özellikleri, çevresel faktörler, trafik, drenaj ve yapım aşamasındaki özen gibi birçok parametrelere bağlıdır.

Superpave yönteminde AASHTO T 283 standardı karışımın nem hasarına karşı dayanımını belirlemede ve kullanılan katkının etkisini incelemekte kullanılmaktadır.

Deney için %7±0,5 hava boşluğuna sahip olan en az 6 numune hazırlanır. Hacim özgül ağırlıkları aynı olacak şekilde iki gruba ayrılır. Birinci grup koşullandırma

işlemine tabi tutulduktan sonra diğer grup ise 25°C sıcaklıkta 2 saat bekletildikten sonra kırılır. Koşullandırma için Şekil 3.13'te verilen pikometre ve vakum cihazı kullanılır.



Şekil 3.13. Piknometre ve vakum cihazı

Numuneler saf su içeren pikometre içine konularak 5 dakika kadar vakum uygulanmaktadır. Vakum işlemiyle numunedeki hava boşluklarının %70-80'i suyla dolmaktadır. %70'ten az olması durumunda vakum işlemine devam edilmeli, %80'den fazla olması durumunda ise tahribat olması nedeniyle bu numuneler deneylerde kullanılmamalıdır (AASHTO T 283, 2003).

Numunelerin doygunluk derecesi aşağıdaki formüllerle bulunur.

$$J = B' - B \quad (3.4)$$

$$S' = J/I * 100 \quad (3.5)$$

$$I = V_a * V/100 \quad (3.6)$$

J: Absorbe edilen su hacmi (cm<sup>3</sup>)

B': Vakum işleminden sonra numunenin doygun kuru yüzey ağırlığı (gr)

B: Vakum işleminden önce numunenin doygun kuru yüzey ağırlığı (gr)

S': Doygunluk derecesi (%)

I: Hava boşluğu hacmi (cm<sup>3</sup>)

V<sub>a</sub> : Hava boşluğu yüzdesi

V: Numune hacmi (cm<sup>3</sup>)

Vakum işleminden sonra numuneler plastik film ile kaplanır ve ağzı kapanabilen plastik torbalara koyulur. Standartta göre numunelerin önce -18°C sıcaklıkta 16 saat, sonra 60°C suda 24 saat bekletilmesi gerekmektedir. Bu işlemden sonra bütün numuneler 25°C suda 2 saat bekletildikten sonra 50±2 mm/dk hızla yükleme yapılarak kırılmaktadır.

Deney sonunda çekme dayanımı oranının (TSR) değerleri aşağıda verilen formüller ile bulunur. Superpave yöntemine göre bu değer minimum %80 olmalıdır.

$$TS = \frac{2P_{mak}}{\pi dt} \quad (3.7)$$

$$TSR = \frac{TS_{yaş}}{TS_{kuru}} * 100 \quad (3.8)$$

TS : Çekme dayanımı (kPa)

P<sub>mak</sub> : Kırılmaya neden olan maksimum yük (kN)

d : Ortalama numune çapı (m)

t : Ortalama numune yüksekliği (m)

### 3.2.4. İndirekt Çekme Yorulma Deneyi

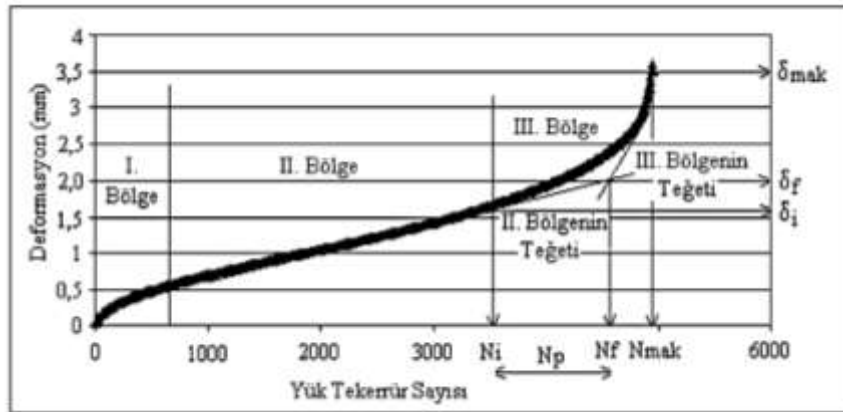
Yol inşasında kullanılan bitümlü malzemeler, üzerinden geçen her taşıtla kısa süreli yüke maruz kalmakta ve bu yükler mikro hasarlara sebep olmaktadır. Oluşan mikro hasarlar uzun vadede yorulma çatlağı adı verilen kaplama bozulmasına yol açmaktadır (Francken, 1998). Yorulma çatlakları, bitümlü sıcak karışımlarda en çok görülen ve tekrarlı yükler sonucu çatlak oluşumunu takiben kademeli olarak artış gösteren bir bozulma türüdür (Kök, 2007).

Şekil 3.14'te verilen indirekt çekme yorulma deneyi (İÇYD) için ITSM deneyinde kullanılan cihazlar kullanılır. Standart deney sıcaklığı 25°C'dir ve aynı şekilde kabin sayesinde farklı sıcaklıklarda da yapılabilir. Numuneler en az 3 saat bu kabinde bekletilmelidir. Numune, yükleme çerçevesine yerleştirilir, düşey deformasyonu okuyacak LVDT denilen doğrusal değişken türevsel dönüştürücüler ayarlanır ve deneye başlanır. ITSM'nin aksine İÇYD deneyinde numune kırılıncaya kadar yük uygulanmaktadır. Numuneye düşey çapsal düzlemde tekrarlı basınç gerilmeleri uygulanması sonucu numune düşey doğrultuda orta kısmından yarılmaktadır.



Şekil 3.14. İndirekt çekme yorulma deney düzeneği

Deney sonunda Şekil 3.15.'te görülen grafiğe benzer deformasyon – tekerrür sayısı grafiği çizilir. Yorulma ömrü, grafiğin eğiminin önemli oranda değiştiği II. bölge ve III. bölgeye çizilen teğetlerin kesim noktası olarak tanımlanır (Subagio vd., 2003; Aragao vd., 2010).



Şekil 3.15. Temsili deformasyon - yük tekerrür sayısı grafiği

Çatlak ilerleme oranı ( $r_p$ ) , çatlak oluşumundan itibaren yorulma ömrü sonuna kadar her 1mm deformasyon oluşabilmesi için gerekli yük tekrar sayısını ifade eder ve aşağıdaki gibi hesaplanır (Subagio vd., 2003).

$$r_p = \frac{N_p}{\delta_f - \delta_i} \quad (3.9)$$

$r_p$ : Çatlak ilerleme oranı (darbe sayısı/mm)

$N_p$ : Çatlak ilerlemesi için gerekli yük sayısı

$\delta_i$ : Çatlak başladığı andaki toplam deformasyon (mm)

$\delta_f$ : Yorulma ömründeki toplam deformasyon (mm)

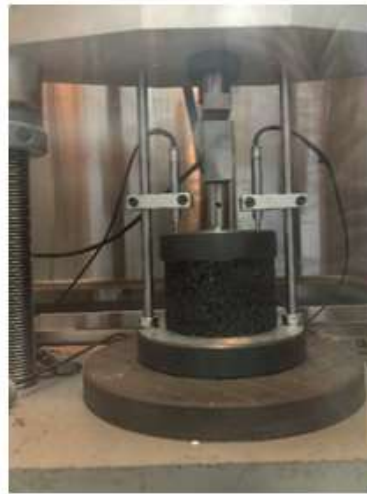
Çatlak ilerleme oranı, çatlak ilerleme hızıyla ters orantılıdır. Çatlak ilerleme oranının büyük olması, çatlak ilerleyişinin daha yavaş olduğunu göstermektedir.

### 3.2.5. Dinamik Sünme Deneyi

Tekrarlı trafik yüklerinin etkisi altındaki üst yapı tabakalarının her birinde kalıcı deformasyonun kademeli olarak artmasıyla tekerlek izi adı verilen bozulmalar oluşmaktadır (Tayfur vd., 2007). Kaplama tabakası trafik yüklerine direkt maruz kalır ve bu sebeple kalıcı deformasyonlardan en fazla etkilenen tabakadır (Khodaii ve Mehrara, 2009).

Şekil 3.16'da verilen dinamik sünme deneyi, bitümlü sıcak karışımların kalıcı deformasyon oluşumuna karşı dayanımını belirlemek için yaygın olarak kullanılan deneylerden biridir. Deneyde sabit bir yük tekrarlı olarak numunenin yüzeyine uygulanmaktadır. LVDT'ler numune üzerine yerleştirilen metal plak üzerine dik olarak ayarlanır ve her bir yük tekrarında oluşan plastik ve elastik deformasyonlar tespit edilir.

Deney iklimlendirme kabini sayesinde istenilen sıcaklıklarda yapılabilmektedir. Başlamadan önce numuneler kabinde en az 4 saat deney sıcaklığında beklemelidir. Gerekli bilgiler yazılıma girildikten sonra numuneler yerleştirilir ve deformasyonları okuyacak LVDT'ler ayarlanarak deneye başlanır. Numuneye önce ön yükleme uygulanır ve birincil oturmanın oluşması istenir. Ön yükleme sonrasında belirlenen gerilme miktarında tekrarlı yük uygulanarak istenen yük tekrarına veya numuneler kırılıncaya kadar devam edilir.



Şekil 3.16. Dinamik sünme deney düzeneği

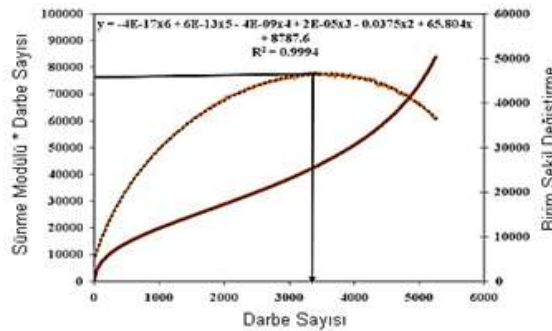
Deney sonucunda toplam kalıcı şekil değiştirme – tekerrür sayısı grafiği elde edilir. Şekil 3.17’de görüldüğü gibi eğri 3 bölgeden oluşur.



Şekil 3.17. Şekil değiştirme – yük tekrarı grafiği

Birinci bölgede, konsolidasyon meydana gelerek hacim azalmakta ve şekil değiştirme başlangıçta hızla artarken daha sonra artış hızı düşmektedir. İkinci bölgede toplam şekil değiştirme lineere yakın bir değişim göstermektedir. Üçüncü bölgede ise kayma deformasyonları oluşmakta ve şekil değiştirme miktarı tekrar yükselişe geçmektedir. Witczak'ın teorisine göre üçüncü bölgenin başladığı noktadaki yük tekrar sayısı "akma sayısı" olarak tanımlanmış ve akma sayısının kalıcı deformasyon oluşumuna karşı dayanımın bir göstergesi olduğu çeşitli çalışmalarla belirlenmiştir (Witczak vd., 2002).

Akma sayısını tespit etmek için diğer bir yöntem ise Bausano ve Williams tarafından geliştirilmiştir (Bausano ve Williams, 2007). Yatay eksen darbe sayısı ve dikey eksen ise sünme modülü ile darbe sayısının çarpımı olmak üzere bir grafik çizilir. Grafiğin tepe noktası akma sayısını vermektedir (Şekil 3.18).



Şekil 3.18. Akma sayısının bulunması (Bausano ve Williams, 2007)

#### 4. DENEYSEL ÇALIŞMA

Tez çalışmasında, ana bağlayıcı olarak Batman TÜPRAŞ rafinerisinden temin edilen PG 52-28 sınıfı saf bağlayıcı kullanılmıştır. Şlempe ve cibreden elde edilen aktif karbon 3 farklı oranda (%5, %10 ve %15) bitümlü bağlayıcıya ilave edilerek katkı maddesi olarak kullanımının bitümlü bağlayıcıların reolojik özelliklerine etkisi belirlenmeye çalışılmıştır. Ardından saf ve 3 farklı oranda aktif karbon içeren modifiye bitümlerle karışım numunesi hazırlanarak aktif karbonun bitümlü sıcak karışımların mekanik özelliklerine etkisi değerlendirilmiştir.

##### 4.1. Deneylerde Kullanılan Katkı Malzemesi

###### 4.1.1. Şlempe ve Cibreden Aktif Karbon Elde Edilmesi

Deneylerde kullanılan konsantre şlempe Eskişehir Şeker Fabrikası Alkol Üretim Tesisleri'nden, Cibre Elazığ Sivrice'deki Eskibağlar Şarap Fabrikası'ndan temin edilmiştir. Cibrenin yıkama, kurutma, öğütme eleme ön işlemleri daha önce gerçekleştirilmiş bir çalışmada yapılmıştır (Arslanoğlu, 2016).

Şekil 4.1'de cibre ve şlempe örnekleri verilmiştir. 50 meş partikül boyutundaki cibre örneği 1:2 oranı oluşturacak tartımdaki şlempe ile blender içerisinde homojen bir şekilde 3 dakika süre ile 22000 devir/dakika hızla karıştırılmıştır. 6 saat sonra örnekler 85 ml'lik porselen krozelere alınmış ve 100°C'deki etüve konulmuştur. Şlempe/cibre (Ş/C)=2/1 oranında hazırlanan karışım örnekleri, 600°C fırında 300 ml/dk hızla azot gazı geçirilecek şekilde 120 dakika bekletilerek piroliz işlemi gerçekleştirilmiştir. Piroliz işlemi için örnekler oda sıcaklığındaki fırına yerleştirilmiş, 10 dk süreyle azot gazı geçirilmiştir. Fırın ısıtılmaya başlanmış, 15 dk'da 600°C sıcaklığa ulaşılmıştır. İşlemden sonra fırından alınan örnekler vakum desikatörde soğutulmuştur. Piroliz ürünleri öğütülmüş ve 200 meşlik (<0.075 mm) elekten elenmiştir. Alınan örnekler, su/(piroliz ürünü) oranı 10, oda sıcaklığında (23-27°C'de), 120 dk süreyle, 200 d/dk hızla çalkalanarak su ile ekstraksiyona tabi tutulmuştur. Ekstraksiyondan arta kalan katı örnekler 2M HCl çözeltisiyle (elde edildiği piroliz ürününün 10 katı miktarda) 12 saat süreyle çalkalanarak karıştırılmıştır. Gooch krozesinden süzülerek sıvısından ayrılan katı madde, nötralliğe kadar yıkama işlemine tabi tutulmuş ve örneklerinin AgNO<sub>3</sub> çözeltisiyle AgCl oluşturmayınca kadar saf su ile yıkanmış ve nihai katı madde



100°C’de 12 saat süreyle kurutulmuştur. Tartımları belirlenmiş ve çeşitli karakterizasyon işlemleri yapılmıştır (Arslanoğlu, 2016). Şekil 4.2’de elde edilen aktif karbon gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Konsantre şlempe ve cibre örnekleri.



Şekil 4.2. Deneylerden elde edilen aktif karbon

#### 4.1.2. Deneylerde Kullanılan Şlempe ve Cibrenin Özellikleri

Çalışmada kullanılan konsantre şlempe üzerinde yapılan analizlerin sonuçları Tablo 4.1 ve 4.2’de verilmiştir.

**Tablo 4.1.** Konsantre şlempenin bazı özellikleri

| ÖZELLİK                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | DEĞER  |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|
| Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 1,31   |
| pH <sup>a</sup>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 5,3    |
| İletkenlik (µs/cm)(×1000) <sup>b</sup>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 332    |
| Bulanıklık (NTU) (×1000) <sup>b</sup>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 29,8   |
| 600°C’de Isıtma Kaybı (%) <sup>c</sup>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 50,32  |
| Kül (950°C’de) (%) <sup>d</sup>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 9,9    |
| Oksitlenebilirlik (KOİ) (mg-O <sub>2</sub> /l) <sup>b</sup>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 571000 |
| Vizkozite (cP)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 936    |
| Kuru Madde (Bx)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 63,5   |
| Toplam Azot (mg-N/ kg) <sup>c</sup>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 28600  |
| Fosfor (mg/kg) <sup>c</sup>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 207    |
| Potasyum (mg/kg) <sup>c</sup>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 66500  |
| Sodyum (mg/kg) <sup>c</sup>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 14900  |
| Kalsiyum (mg/kg) <sup>c</sup>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 3800   |
| Mağnezyum (mg/kg) <sup>c</sup>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 565    |
| <sup>a</sup> Konsantre şlempenin beş kat seyreltilmesiyle elde edilen ortamda yapılan ölçümler.<br><sup>b</sup> Konsantre şlempenin bin kat seyreltilmesiyle elde edilen ortamda yapılan ölçümlerden yapılan hesaplamalarla.<br><sup>c</sup> 600°C’de sabit tartım sonucu. <sup>d</sup> Konsantre şlempenin 950°C’de sabit tartım sonucu.<br><sup>e</sup> Konsantre şlempenin uygun oranda seyreltilmesiyle yapılan ölçümlerden yapılan hesaplamalarla. |        |

**Tablo 4.2.** Konsantre şlempenin elementel bileşimi.

| BİLEŞEN (%)                                                                                                | DEĞER |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| C                                                                                                          | 21.89 |
| H                                                                                                          | 7.03  |
| N                                                                                                          | 3.14  |
| S                                                                                                          | 0.53  |
| O <sup>a</sup>                                                                                             | 21.01 |
| <sup>a</sup> % Ağırlıkça C,H,N,S değerleri toplamının (100-%su-%kül) değerinden çıkarılmasıyla hesaplandı. |       |

Deneylerde kullanılan cibrede yapılan analizlerin sonuçları Tablo 4.3 ve 4.4’de görülmektedir.

**Tablo 4.3.** Cibrenin bazı özellikleri

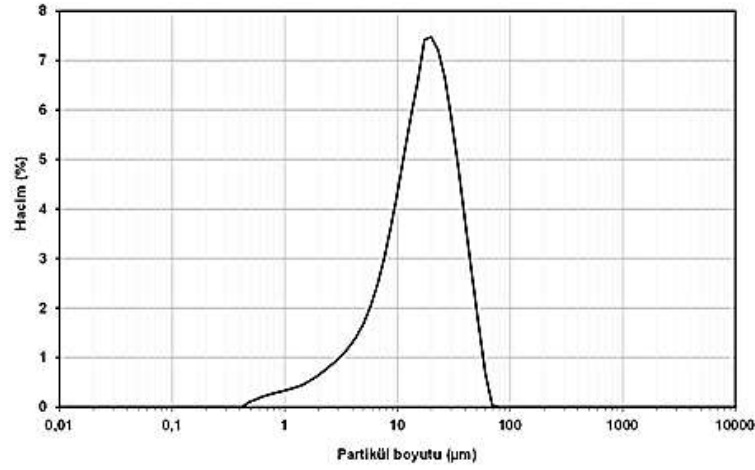
| ÖZELLİK                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | DEĞER  |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|
| Yığın yoğunluğu (g/cm <sup>3</sup> ) <sup>a</sup>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 0.89   |
| Gerçek yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> ) <sup>b</sup>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 1.4974 |
| 105°C’de ısıtma kaybı (nem)(%) <sup>c</sup>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 3.1    |
| 600°C’de ısıtma kaybı (%) <sup>d</sup>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 74.9   |
| Kül (%) <sup>e</sup>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 5.6    |
| Potasyum (%) <sup>f</sup>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 1.74   |
| Sodyum (mg/kg) <sup>f</sup>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 1185   |
| Kalsiyum (mg/kg) <sup>f</sup>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 3500   |
| Mağnezyum (mg/kg) <sup>f</sup>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 810    |
| <sup>a</sup> Belirli hacimdeki kaba doldurulmuş cibrenin ağırlığı.<br><sup>b</sup> Helyum piknometresiyle bulunan değer.<br><sup>c</sup> 80°C’de kurutularak hazırlanmış cibrenin 105°C’de 24 saat bekletilmesiyle.<br><sup>d</sup> 80°C’de kurutulmuş cibrenin 600°C’de sabit tartım sonucu.<br><sup>e</sup> 80°C’de kurutulmuş cibrenin 950°C’deki sabit tartım kalıntısı.<br><sup>f</sup> Külün 0.1 M HCl’de çözündürülmesi ile elde edilen çözeltinin analizi ile. |        |

**Tablo 4.4.** Cibrenin elementel bileşimi.

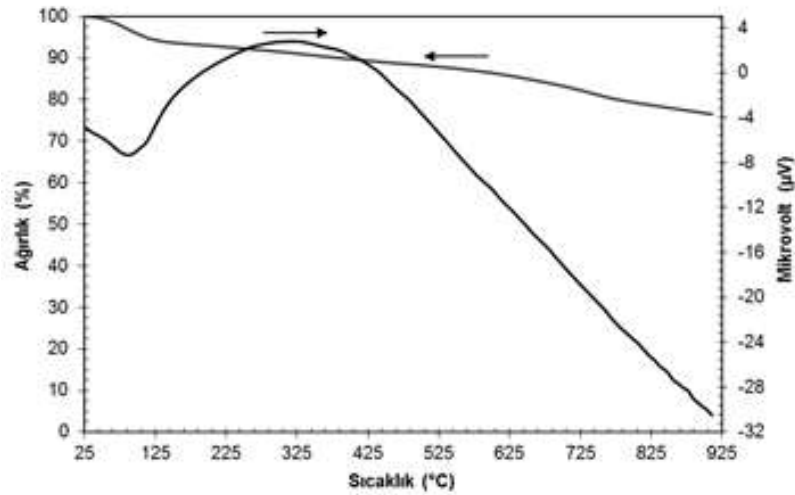
| BİLEŞEN (%)                                                                                                 | DEĞER |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| C                                                                                                           | 45.94 |
| H                                                                                                           | 5.58  |
| N                                                                                                           | 0.66  |
| S                                                                                                           | 0.09  |
| O <sup>a</sup>                                                                                              | 39.03 |
| <sup>a</sup> % Ağırlıkça C,H,N,S değerleri toplamının (100-%nem-%kül) değerinden çıkarılmasıyla hesaplandı. |       |

İlk aşamada konsantre şlempe, cibreye emdirilip kurutulduktan sonra pirolize tabi tutularak elde edilen karbonize maddenin içerdiği potasyumun su ile ekstrakte edilerek potasyum geri kazanılmış ve bu işlemde geriye kalan katı maddenin asit çözeltisiyle stabilize edilip nötralliğe kadar suyla yıkandıktan sonra kurutularak elde edilen aktif karbonun karakteristik özellikleri de birlikte araştırılmıştır (Arslanoğlu, 2016).

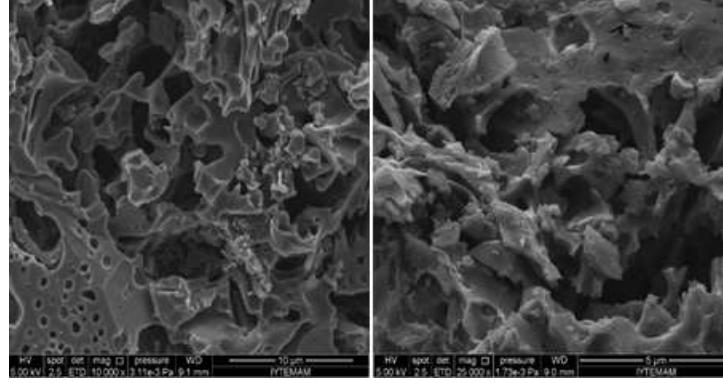
Cibre, konsantre şlempe ve Ş/C=2 oranındaki kurutulmuş karışımlarının 600°C’de piroliz edildikten sonra elde edilen aktif karbona ait partikül boyut dağılımı (Malvern Mastersizer 2000 ) Şekil 4.3’te, TG/DTA (Perkin Elmer Diamond TG/DTA) diyagramı Şekil 4.4’de, SEM görüntüsü (FEI Quanta 250 FEG) Şekil 4.5’te ve X-ışını difraktogramı (Rigaku DMAX-2200) Şekil 4.6’da verilmiştir.



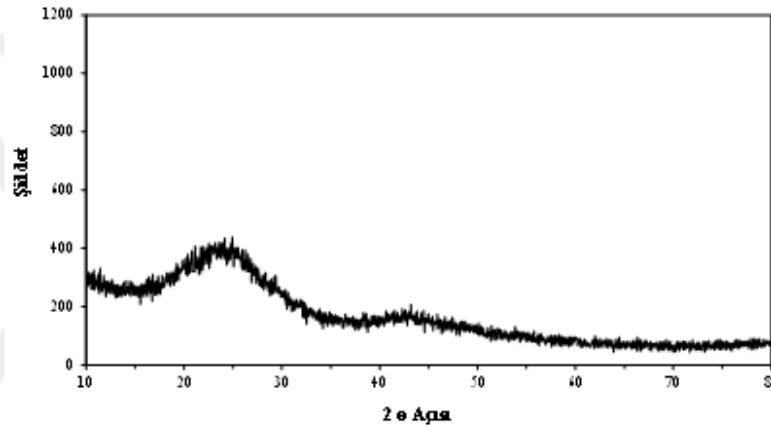
**Şekil 4.3.** Elde edilen aktif karbonun partikül boyut dağılımı (Piroliz şartları :Ş/C=2, Piroliz sıcaklığı: 600°C, Piroliz süresi : 120 dakika, Asit ile stabilizasyon : 2N HCl, Sıvı/Katı oranı = 10, Oda sıcaklığı, Kurutma sıcaklığı: 100°C).



**Şekil 4.4.** Elde edilen aktif karbonun TG/DTA diyagramı (Piroliz şartları: Ş/C=2, Piroliz sıcaklığı: 600°C, Piroliz süresi: 120 dakika, Asit ile stabilizasyon: 2N HCl, Sıvı/Katı oranı = 10, Oda sıcaklığı, Kurutma sıcaklığı: 100°C).



**Şekil 4.5.** Elde edilen aktif karbonun SEM görüntüleri (Piroliz şartları : $S/C=2$ , Piroliz sıcaklığı: 600°C, Piroliz süresi : 120 dakika, Asit ile stabilizasyon : 2N HCl, Sıvı/Katı oranı = 10, Oda sıcaklığı, Kurutma sıcaklığı: 100°C).



**Şekil 4.6.** Elde edilen aktif karbonun X ışını difraktogramı (XRD) (Piroliz şartları : $S/C=2$ , Piroliz sıcaklığı: 600°C, Piroliz süresi : 120 dakika, Asit ile stabilizasyon : 2N HCl, Sıvı/Katı oranı = 10, Oda sıcaklığı, Kurutma sıcaklığı: 100°C).

Aktif karbonun fizikokimyasal özellikleri Tablo 4.5'te listelenmiştir. Aktif karbonun, Tablo 4.5'te gözenek büyüklüğü dağılımları verildiği gibi, 22.7 Å'luk bir ortalama gözenek çapına ve bir mikro mezo gözenekli yapıya sahiptir. Aktif karbonun BET (Micromeritics ASAP 2020) spesifik yüzey alanı 498.4 m<sup>2</sup>/g olarak belirlenmiştir. Elde edilen aktif karbonun yüzey alanı ticari literatürde kullanılan aktif karbonların yüzey alanlarından daha düşüktür. Aktif karbon örneğinin SEM görüntüsü (Şekil 4.5), dış yüzeyinin çok sayıda düzensiz kaviteye ve gözenekliliğe sahip olduğunu göstermektedir. Dolayısıyla, sıvı ortamdaki iyonların gözeneklere adsorbe olması muhtemeldir. Adsorbentlerin yığın yoğunluğu ve partikül büyüklüğü de uygulanabilirlik açısından önemli parametrelerdir. Bir adsorbanın parçacık boyutu ne kadar ince olursa, adsorpsiyon oranı o kadar hızlı olur. Ayrıca, aktif karbonun depolanması, ayrılabilirlik (karışımda olduğu gibi filtrelenebilir), bir kolona ambalajlama vb. bu parametrelere

bağlıdır. Adsorbentin yoğunluğu sadece başlangıç malzemesinin doğasına değil, aynı zamanda hazırlama işlemine de bağlıdır. Aktif karbon partiküllerinin hacim bazlı ortalama parçacık büyüklüğü (Şekil 4.3) 19.49  $\mu\text{m}$  ve  $D_{v10}$ ,  $D_{v50}$  ve  $D_{v90}$  yüzdelilerinin Tablo 4.5'te kümülatif değeri verilmiştir. Partiküllerin maksimum boyutu 75  $\mu\text{m}$  ve % 90'ından daha fazlası 38.417  $\mu\text{m}$  olarak belirlenmiştir. Yoğunluk çeşitli aktif karbonların tanımlamak için kullanılabilir. Makro gözenekli karbonun kütle yoğunluğu  $> 1 \text{ g/cm}^3$ 'tür. Mezo gözenekli karbon, 0.85 ila  $1.0 \text{ g/cm}^3$  arasında değişen bir yığın yoğunluğuna sahiptir. Bunun yerine mikro gözenekli karbon  $< 0.85 \text{ g/cm}^3$  bir değere sahiptir. Bu tanıma uygun olarak, bu çalışmada kullanılan aktif karbonun görünür yoğunluğu  $0.78 \text{ g/cm}^3$  olan mikro-mezo gözenekli bir yapıya sahiptir. Genelde makro gözenekli veya mezo gözenekli karbonlar, büyük moleküllerin uzaklaştırılması için kullanılırken mikro gözenekli aktif karbonlar küçük moleküllerin uzaklaştırılması için daha uygundur. Şekil 4.6' da çalışmada aktif karbonunun X ışını difraktogram grafiği verilmektedir. Görüldüğü gibi piroliz sonucunda elde edilen çar su ve asit ile yıkandıktan sonra yapıdaki inorganik bileşiklerin tamamına yakını çözünüp gittiğinden yapıda kristal halinde bileşik bulunmadığından dolayı aktif karbonun X ışını difraktogramı amorf olarak görülmektedir (Arslanoğlu, 2016).

**Tablo 4.5.** Elde edilen aktif karbonun özellikleri (Piroliz şartları : $\text{S/C} = 2$ , Piroliz sıcaklığı :  $600^\circ\text{C}$ , Piroliz süresi : 120 dakika, Asit ile stabilizasyon : 2N HCl, sıvı/katı oranı = 10, Kurutma Sıcaklığı:  $100^\circ\text{C}$  ).

| Özellik                                                        | Değer  |
|----------------------------------------------------------------|--------|
| Görünür yoğunluk ( $\text{g/cm}^3$ )                           | 0.7814 |
| Gerçek yoğunluk ( $\text{g/cm}^3$ )                            | 1.7223 |
| BET yüzey alanı (Mikro+Mezo) ( $\text{m}^2/\text{g}$ )         | 498.4  |
| Mikropor yüzey alanı ( $\text{m}^2/\text{g}$ )                 | 379.1  |
| Mezopor yüzey alanı ( $\text{m}^2/\text{g}$ )                  | 119.3  |
| Langmuir yüzey alanı ( $\text{m}^2/\text{g}$ )                 | 658.2  |
| <sup>1</sup> Por hacmi (Mikro+Mezo) ( $\text{cm}^3/\text{g}$ ) | 0.2463 |
| Mikropor hacmi ( $\text{cm}^3/\text{g}$ )                      | 0.1757 |
| Mezopor hacmi ( $\text{cm}^3/\text{g}$ )                       | 0.0706 |

**Tablo 4.5.** Elde edilen aktif karbonun özellikleri (Piroliz şartları :Ş/C =2, Piroliz sıcaklığı : 600°C, Piroliz süresi : 120 dakika, Asit ile stabilizasyon: 2N HCl, sıvı/katı oranı=10,Kurutma Sıcaklığı: 100°C ). (Devamı)

|                                                                                                          |          |          |          |          |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|----------|----------|----------|
| <sup>2</sup> Por çapı (Å)                                                                                | 22.7     |          |          |          |
| Partikül boyutu [Ağırlıklı ortalama(D[4,3]), µm]                                                         | 19.489   |          |          |          |
| Partikül boyutu [d(0.1), µm]                                                                             | 4.398    |          |          |          |
| Partikül boyutu [d(0.5), µm]                                                                             | 16.820   |          |          |          |
| Partikül boyutu [d(0.9), µm]                                                                             | 38.417   |          |          |          |
| Kül (%)                                                                                                  | 5.1      |          |          |          |
| Uçucu madde (%)                                                                                          | 28.70    |          |          |          |
| Sabit karbon (%)                                                                                         | 66.20    |          |          |          |
| <u>Elementel analiz</u>                                                                                  |          |          |          |          |
| <u>C</u>                                                                                                 | <u>H</u> | <u>N</u> | <u>S</u> | <u>O</u> |
| 63.5                                                                                                     | 2.38     | 3.70     | 0.60     | 24.72    |
| <sup>1</sup> 1278 Å ‘dan küçük toplam por hacmi <sup>2</sup> Adsorpsiyon ortalama por çapı, (4V/ A, BET) |          |          |          |          |

#### 4.1.3. Aktif Karbon Kullanılarak Modifiye Bitüm Hazırlanması

Çalışmada modifiye bitümler aşağıda belirtildiği şekilde hazırlanmıştır:

- Saf bağlayıcı, 150°C sıcaklığa sahip etüve konularak yaklaşık 60 dakika bekletilmiştir.
- 350 gr saf bitüm karıştırma kabına konulmuş, belirlenen üç oranda (%5, %10 ve %15) aktif karbon karıştırma kabına ilave edilmiştir.
- Karıştırma kabı ısıtıcı tablaya yerleştirilmiş ve Şekil 4.7’te görülen karıştırma düzeneği için gerekli ayarlamalar yapılarak karıştırma işlemine başlanmıştır. Karıştırma esnasında 4 bıçaklı karıştırıcı kullanılmıştır.



**Şekil 4.7.** Modifiye bitüm mikseri ve karıştırma başlığı

d.) Saf bitüm ve aktif karbon katkı maddesi; 1 saat süresince, 1000 devir/dakika karıştırma hızında ve 160°C karıştırma sıcaklığında karıştırılmıştır.

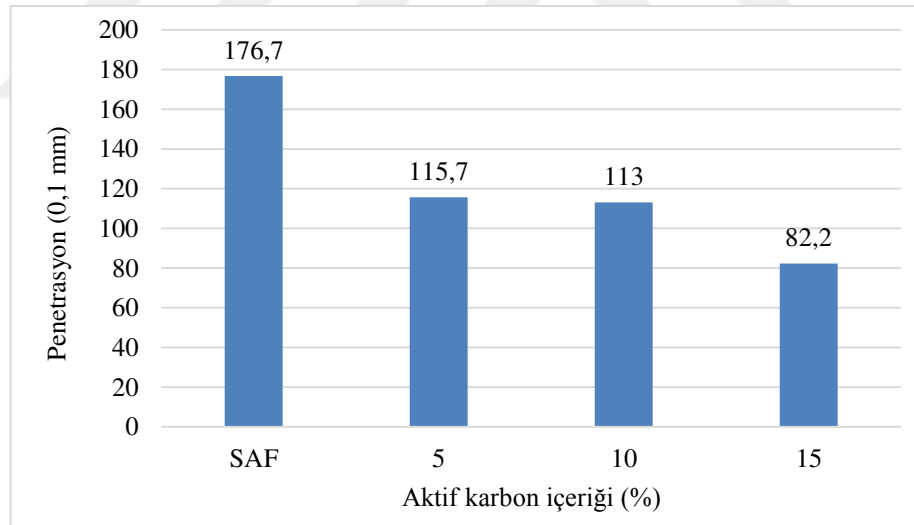
f.) Hazırlanan modifiye bitüm karışımı cam behere aktarılmış, diğer deneylerde kullanılmak üzere uygun şartlarda saklanmıştır.

Karıştırmada kullanılan prosedür her seferinde aynı şekilde uygulanmış böylece karıştırma prosedürünün deney sonuçlarına etki etmesi engellenmiştir.

## 4.2. Aktif Karbonun Bitümlü Bağlayıcıların Reolojik Özelliklerine Etkisinin Değerlendirilmesi

### 4.2.1. Penetrasyon Deney Sonuçları

Saf ve 3 farklı oranda (%5, %10 ve %15) aktif karbon içeren modifiye bitüme EN 1426 standardına göre uygulanan penetrasyon deney sonuçları Şekil 4.8’de görülmektedir.



Şekil 4.8. Penetrasyon değerlerinin aktif karbon içeriği ile değişimi

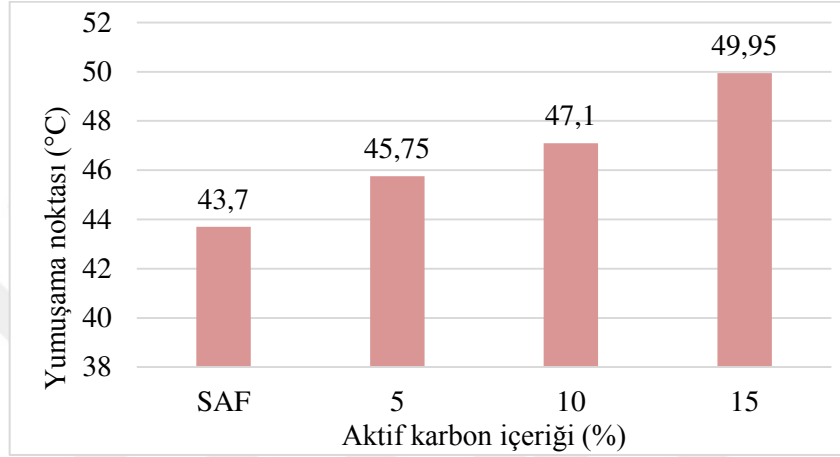
Şekil 4.8’de görüldüğü üzere aktif karbon kullanımı bitümlü bağlayıcıların penetrasyon değerlerini azaltmış dolayısıyla bitümlü bağlayıcıların kıvamını (sertliğini) arttırmıştır. %5 ve %10 aktif karbon kullanımı penetrasyon değerlerine benzer etki göstermiştir (saf bitüme göre yaklaşık %35 azalma). %15 aktif karbon kullanılması durumunda ise penetrasyon değeri %53,5 oranında azalmıştır. Bu durum özellikle %15



aktif karbon kullanımının saf bağlayıcıya göre kıvamı önemli miktarda arttıracığını göstermektedir.

#### 4.2.2. Yumuşama Noktası Deney Sonuçları

Saf ve modifiye bitümlere EN 1427 standardına göre uygulanan yumuşama noktası deney sonuçları Şekil 4.9’da görülmektedir.



Şekil 4.9. Aktif karbon kullanımının yumuşama noktası değerlerine etkisi

Şekil 4.9’da görüldüğü üzere katkı içeriği arttıkça yumuşama noktası değerleri artmaktadır. %5 aktif karbon kullanılması durumunda yumuşama noktası değeri saf bağlayıcıya göre %4,7, %10 aktif karbon kullanılması durumunda %7,8 ve %15 oranında aktif karbon kullanılması durumunda ise %14,3 oranında artmıştır. Yumuşama noktası değerleri penetrasyon değerleri ile uyum göstermiş, aktif karbon kullanılması ile bağlayıcıların kıvamı artmıştır.

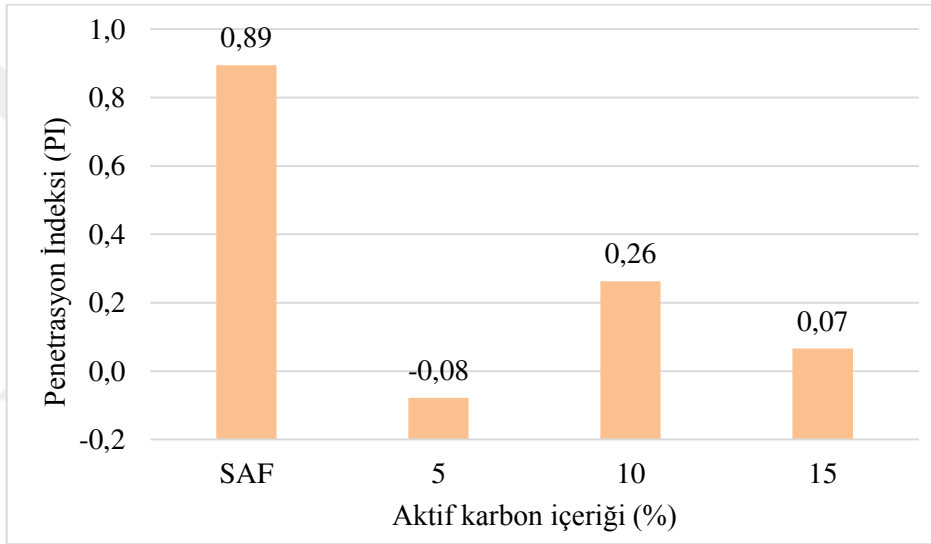
#### 4.2.3. Bitümlü Bağlayıcıların Isıya Karşı Hassasiyetleri

Bitümlü bağlayıcıların ısıya karşı hassasiyetleri penetrasyon ve yumuşama noktası değerlerinden faydalanılarak belirlenen penetrasyon indeksi (PI) değerlerinden yola çıkılarak belirlenmiştir. Penetrasyon indeksi değerlerinin belirlenmesinde aşağıdaki bağıntılar kullanılmıştır.

$$A = \frac{\log 800 - \log P_{25}}{T_{YN} - 25} \quad (4.1)$$

$$PI = \frac{20 - 500A}{1 + 50A} \quad (4.2)$$

Denklemlerde  $P_{25}$ , 25°C sıcaklıkta yapılan standart penetrasyon değerini,  $T_{YN}$  ise yumuşama noktası (halka bilye metodu) değerini ifade etmektedir. PI değeri ile ısıya karşı hassasiyet arasında ters orantı bulunmaktadır. PI değeri arttıkça ısıya karşı hassasiyet azalmaktadır. Bağlayıcıların penetrasyon indeksi değerleri Şekil 4.10'da görülmektedir.

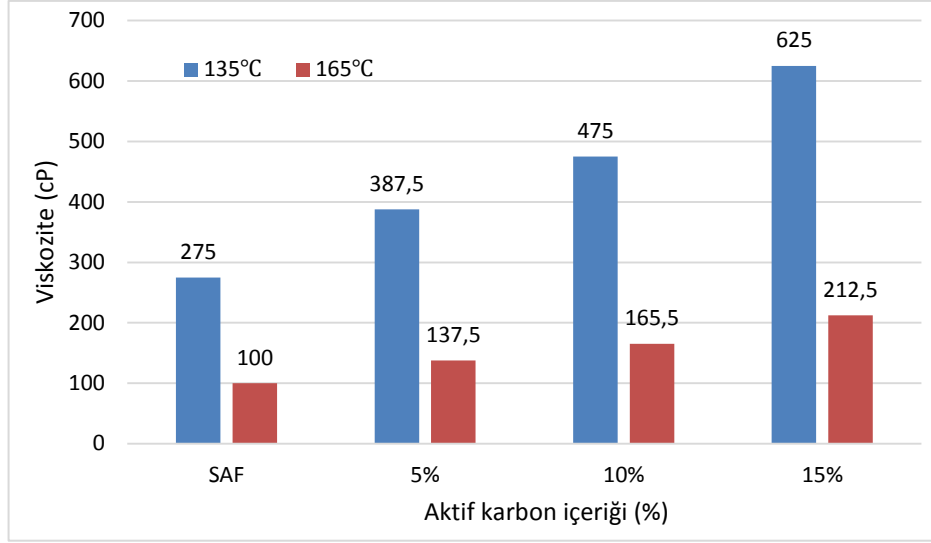


Şekil 4.10. Aktif karbonun PI değerleri üzerindeki etkisi

Şekil 4.10'da görüldüğü üzere aktif karbon kullanılması ile PI değerleri düzenli bir şekilde değişmemiştir. Saf bağlayıcı ile karşılaştırıldığında aktif karbon modifiye bitümlerin PI değerlerinin azaldığı dolayısıyla aktif karbon kullanılması ile bitümlü bağlayıcıların ısıya karşı hassasiyetlerinin arttığı tespit edilmiştir.

#### 4.2.4. Dönel Viskozite Deney Sonuçları

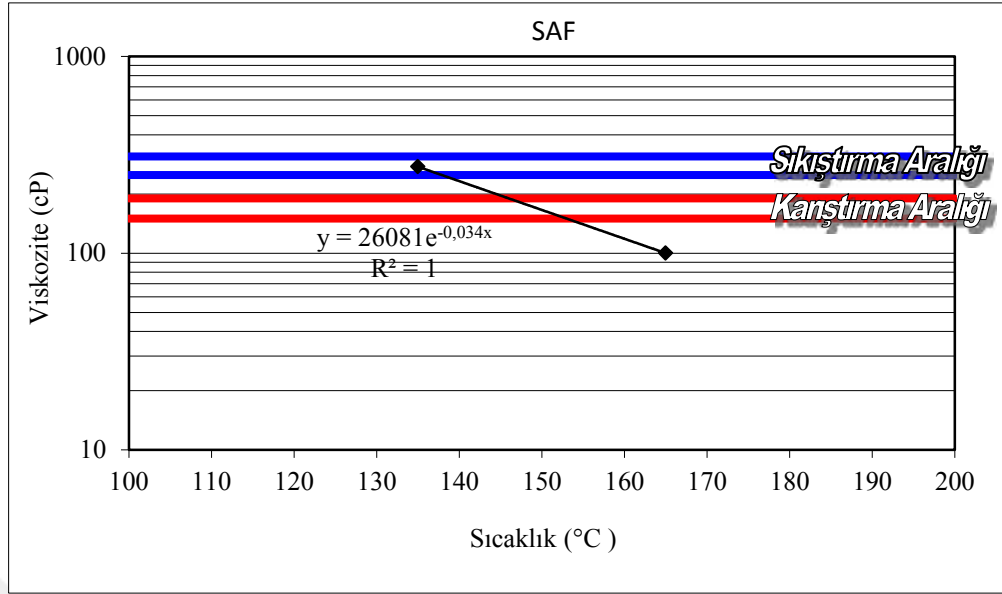
Çalışmada saf ve aktif karbon modifiyeli bitümler üzerinde iki farklı sıcaklıkta (135°C ve 165°C) ASTM D 4402 standardına göre dönel viskozite (RV) deneyi uygulanmıştır. Saf ve modifiye bitümlere uygulanan RV deney sonuçları Şekil 4.11'de verilmiştir.



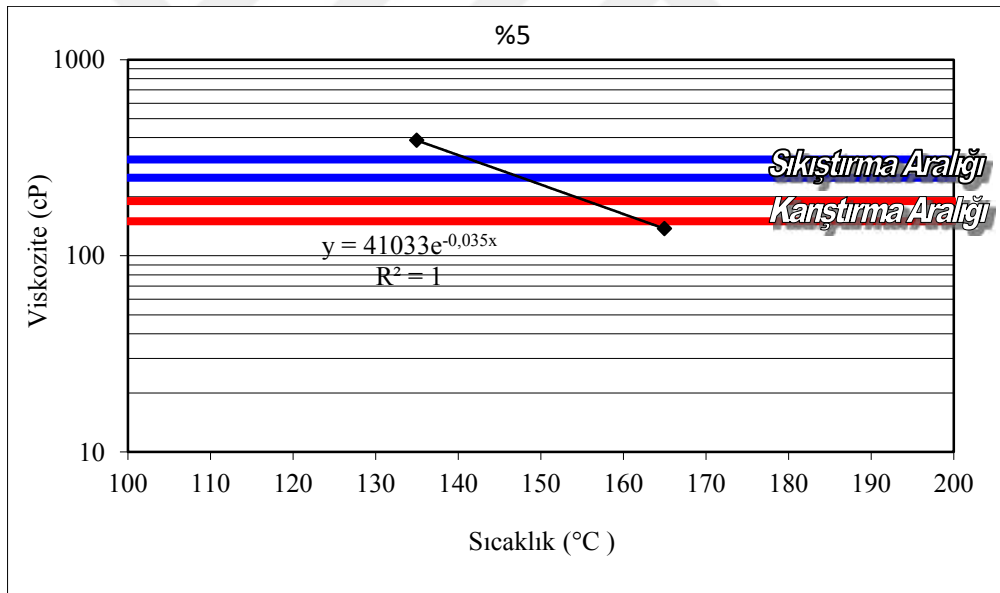
**Şekil 4.11.** Saf ve modifiye bitümlerin viskozite değerleri

Şekil 4.11’de görüldüğü üzere bütün bağlayıcıların 135°C sıcaklıktaki viskozite değeri üst sınır olan 3000 cP’in altında tespit edilmiştir. Bu durum pompalanabilirlik açısından bütün bağlayıcıların uygun olduğunu göstermektedir. Katkı kullanımı ile her iki sıcaklıkta viskozite değerleri düzenli olarak artmıştır. 135°C sıcaklıkta %5, %10 ve %15 aktif karbon kullanımı ile viskozite değeri saf bağlayıcıya göre sırasıyla %40,9 ; %72,7 ve %127,3 oranlarında artmıştır. 165°C sıcaklıkta ise saf bağlayıcıya göre viskozite değerleri %5 aktif karbon kullanılması ile %37,5 ; %10 aktif karbon kullanılması ile %65,5 ve %15 aktif karbon kullanılması ile %112,5 oranlarında artmıştır. Bu durum aktif karbonun oda sıcaklığında bitümlü bağlayıcının kıvamını arttırdığı gibi yüksek sıcaklıklarda da kıvamı arttırdığını göstermektedir.

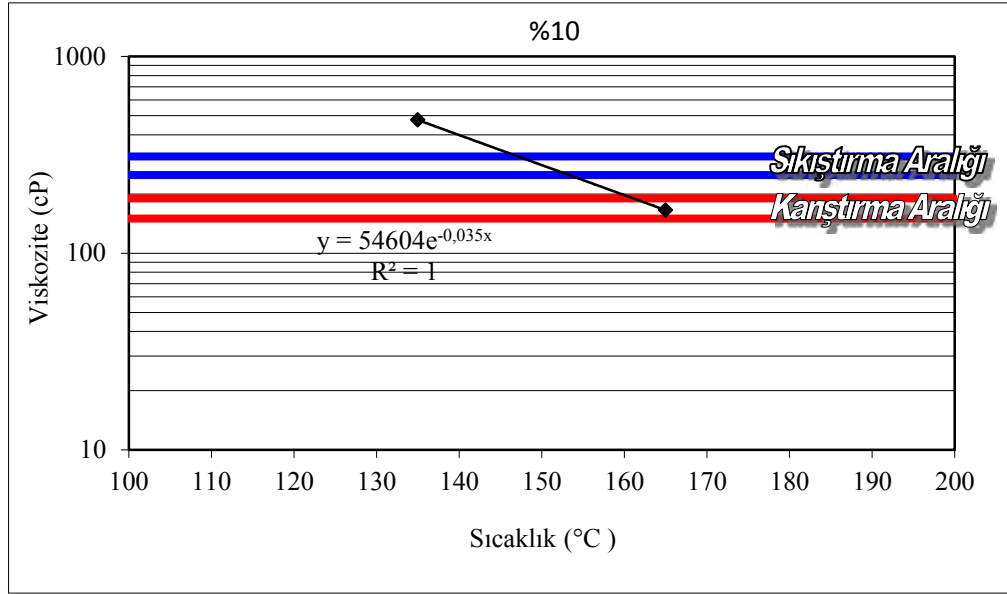
Bitümlü sıcak karışımlarda agrega ve bitümün karıştırılmasında bitümlü bağlayıcının  $170 \pm 20$  cP, sıkıştırılmasında ise  $280 \pm 30$  cP viskozite değerine sahip olması istenmektedir (Zaniewski ve Pumphrey, 2004). Çizilen sıcaklık–viskozite grafiğinde viskozite değerleri işaretlenerek bu değerler bir doğru ile birleştirilmektedir. Bu viskozite değerlerine karşılık gelen sıcaklık değerleri karıştırma ve sıkıştırma sıcaklığı olarak alınmaktadır. Saf ve modifiye bağlayıcıların viskozite-sıcaklık grafikleri Şekil 4.12, 4.13, 4.14 ve 4.15’te gösterilmiştir.



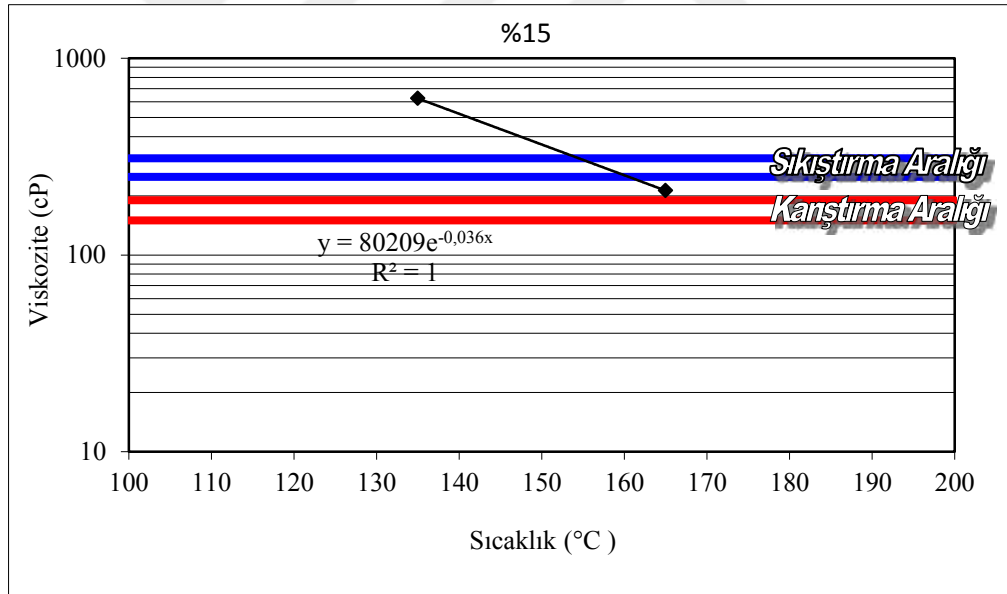
Şekil 4.12. Saf bağlayıcının viskozite-sıcaklık grafiği



Şekil 4.13. %5 aktif karbon içeren bağlayıcının viskozite-sıcaklık grafiği



Şekil 4.14. %10 aktif karbon içeren bağlayıcının viskozite-sıcaklık grafiği



Şekil 4.15. %15 aktif karbon içeren bağlayıcının viskozite-sıcaklık grafiği

Grafiklerden elde edilen denklemlerden karıştırma sıcaklığı için  $170 \pm 20$  cP (150 ve 190 cP) , sıkıştırma sıcaklığı için ise  $280 \pm 30$  cP (250 ve 310 cP) viskozite değerlerine karşılık gelen sıcaklık değerleri belirlenmiştir. Belirlenen değerler Tablo 4.6.'da verilmiştir. Bu değerler bitümlü sıcak karışım numunelerinin hazırlanmasında kullanılmıştır.

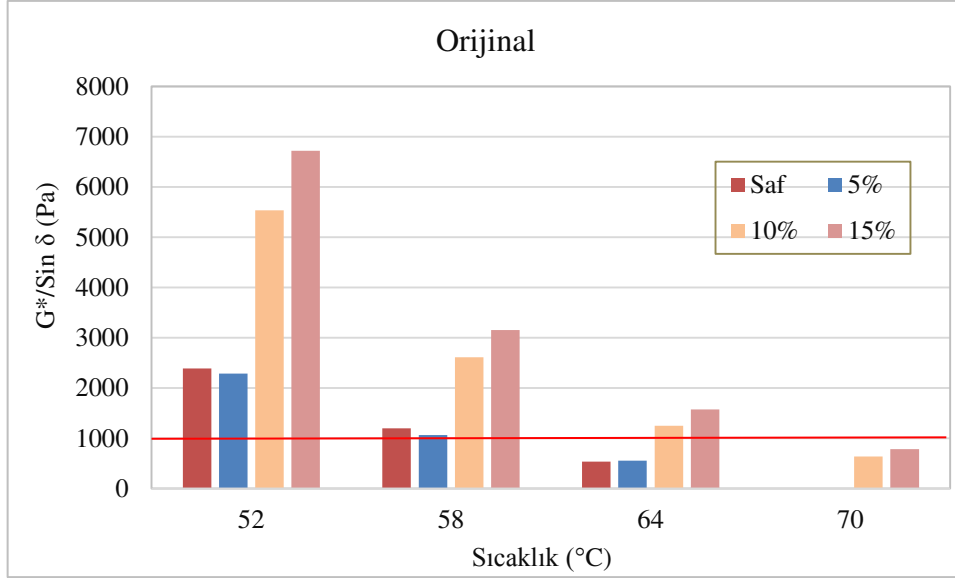
**Tablo 4.6.** Karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları

| Aktif karbon içeriği (%) | Karıştırma sıcaklığı aralığı (°C) | Sıkıştırma sıcaklığı aralığı (°C) |
|--------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| 0                        | 144,8-151,7                       | 130,4-136,7                       |
| 5                        | 153,6-160,3                       | 139,6-145,7                       |
| 10                       | 161,8-168,5                       | 147,8-153,9                       |
| 15                       | 168,0-174,5                       | 154,3-160,3                       |

#### 4.2.5. Dinamik Kayma Reometresi Deney Sonuçları

Çalışmada saf bitüm ve 3 farklı oranda (%5, %10 ve %15) aktif karbon içeren modifiye bitümler üzerinde dinamik kayma reometresi (DSR) deneyi uygulanmıştır. Deneyler 10 rad/sn (1,59 Hz) frekansta 3 farklı tekrarla uygulanmıştır. Deneyler orijinal, kısa dönem yaşlandırılmış ve uzun dönem yaşlandırılmış bağlayıcılara uygulanmıştır. Superpave şartnamesine uygun olarak orijinal ve RTFOT kalıntıları numunelerde 25 mm çapında plak ve 1 mm numune yüksekliği kullanılırken PAV kalıntısı numunelerde 8 mm plak çapı ve 2 mm numune yüksekliği kullanılmıştır.

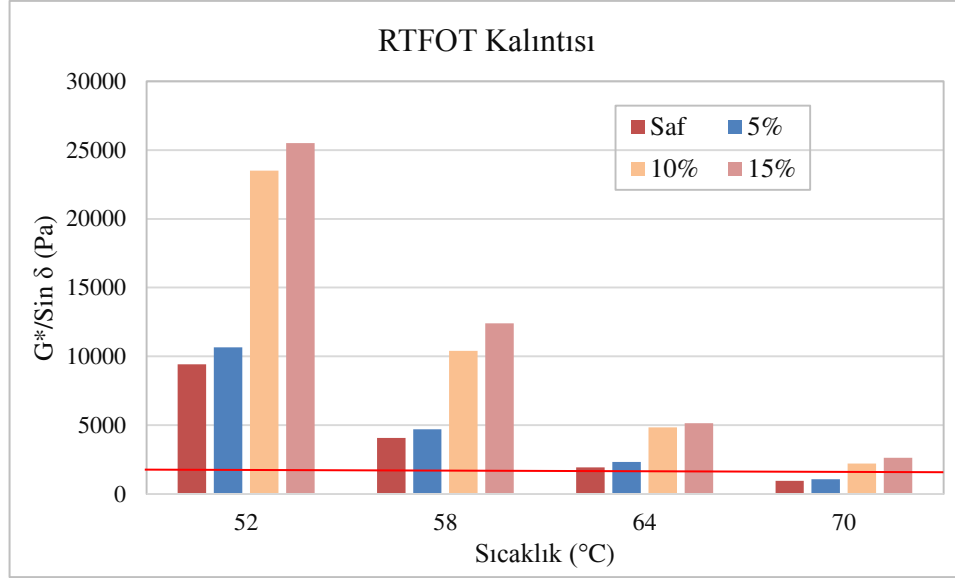
Orijinal bağlayıcılar, Superpave şartnamesine uygun olarak 52-58-64 ve 70°C sıcaklıklarda DSR deneyine tabi tutulmuştur. Superpave şartnamesine göre tekerlek izi dayanım parametresi olan  $G^*/\sin \delta$  değeri 1000 Pa'ın altına düşünceye kadar deney sıcaklığı 6°C arttırılarak deneylere devam edilmiştir. Orijinal bağlayıcılar üzerinde uygulanan DSR deneylerinden elde edilen  $G^*/\sin \delta$  değerlerinin sıcaklıkla değişimi Şekil 4.16'da görülmektedir.



Şekil 4.16. Orijinal bağlayıcıların  $G^*/\sin \delta$  değerlerinin sıcaklıkla değişimi

Şekil 4.16’da görüldüğü üzere bütün bağlayıcılar 52°C ve 58°C sıcaklıkta  $G^*/\sin \delta$  şartname gereksinimini (min. 1000 Pa) sağlamıştır. 64°C sıcaklıkta saf bitüm ve %5 aktif karbon içeren modifiye bitüm şartname kriterini sağlamamıştır. Dolayısıyla bu iki bağlayıcının performans seviyesi yüksek sıcaklık değerinin PG 58 olduğu belirlenmiştir. Saf ve %5 aktif karbon içeren modifiye bitümler 64°C sıcaklıkta şartname kriterini sağlayamadıklarından 70°C sıcaklıkta deneye tabi tutulmamışlardır. %10 ve %15 aktif karbon içeren modifiye bitümler ise 64°C sıcaklıkta şartname kriterini karşılarken 70°C sıcaklıkta şartname kriterini sağlayamamıştır. Bu sonuçlardan %10 ve %15 aktif karbon içeren modifiye bitümlerin performans seviyesi yüksek sıcaklık değeri PG 64 olarak tespit edilmiştir. Tekerlek izi parametreleri değerlendirildiğinde saf bitüm ve %5 aktif karbon içeren modifiye bitümlerin benzer davranış sergiledikleri tespit edilmiştir. %10 ve %15 aktif karbon kullanımı ise saf bağlayıcıya göre tekerlek izi parametresini önemli oranda arttırmıştır. Elde edilen sonuçlardan %5 aktif karbon kullanımının tekerlek izi parametresi açısından etkisinin olmadığı söylenebilmektedir.

RTFOT kalıntıları üzerinde uygulanan DSR deneylerinden elde edilen  $G^*/\sin \delta$  değerlerinin sıcaklıkla değişimleri Şekil 4.17’de görülmektedir.



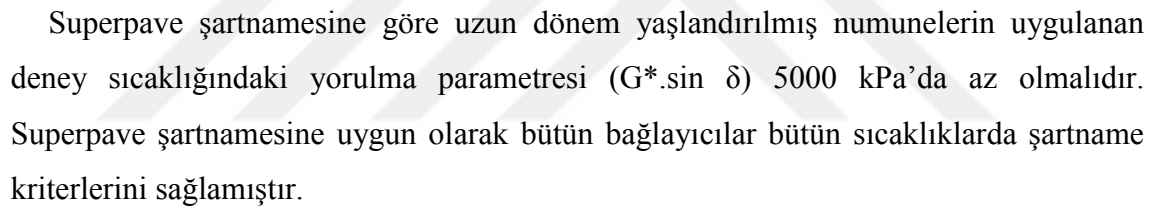
Şekil 4.17. RTFOT sonrası bağlayıcıların  $G^*/\sin \delta$  değerlerinin sıcaklıkla değişimi

Superpave şartnamesine göre RTFOT kalıntılarında  $G^*/\sin \delta$  değeri en az 2200 Pa olmalıdır. Şekil 4.17’de görüldüğü üzere katkı kullanımı ile  $G^*/\sin \delta$  değerleri düzenli olarak artmıştır. 52, 58 ve 64°C sıcaklıklarda bütün bağlayıcılar şartname kriterini sağlarken 70°C sıcaklıkta saf ve %5 aktif karbon içeren bağlayıcılar şartname kriterini sağlayamazken %10 ve %15 aktif karbon içeren modifiye bitümler şartname kriterini sağlamıştır. Şekilde görüldüğü üzere %5 aktif karbon kullanımı orijinal bağlayıcılarda olduğu gibi tekerlek izi parametresini önemli oranda arttırmamış, özellikle %10 ve %15 aktif karbon içeren modifiye bitümlerin tekerlek izi dayanımını önemli oranda artmıştır.

Superpave şartnamesine göre orijinal bağlayıcıların en az 1000 Pa değerini ve RTFOT kalıntılarının en az 2200 Pa değerini sağladığı en yüksek sıcaklık performans seviyesi yüksek sıcaklık değeri olarak belirlenmektedir. Saf ve %5 aktif karbon modifiyeli orijinal (yaşlandırılmamış) bağlayıcılar 58°C sıcaklıkta, RTFOT kalıntıları ise 64°C sıcaklıkta şartname kriterini sağlamıştır. RTFOT kalıntıları şartname kriterini sağlamasına rağmen orijinal bağlayıcılar 64°C sıcaklıkta şartname kriterini sağlayamadığından saf ve %5 aktif karbon modifiyeli bağlayıcıların performans seviyesi yüksek sıcaklık değeri PG 58 olarak belirlenmiştir. Aynı şekilde %10 ve %15 aktif karbon modifiyeli orijinal bitümler 70°C sıcaklıkta şartname kriterini sağlayamadığından bu bağlayıcıların performans seviyesi yüksek sıcaklık değeri PG 64 olarak tespit edilmiştir.



**Şekil 4.18.** Uzun süreli yaşlandırılmış bağlayıcıların G\*.sin  $\delta$  değerlerinin sıcaklıkla değişimi



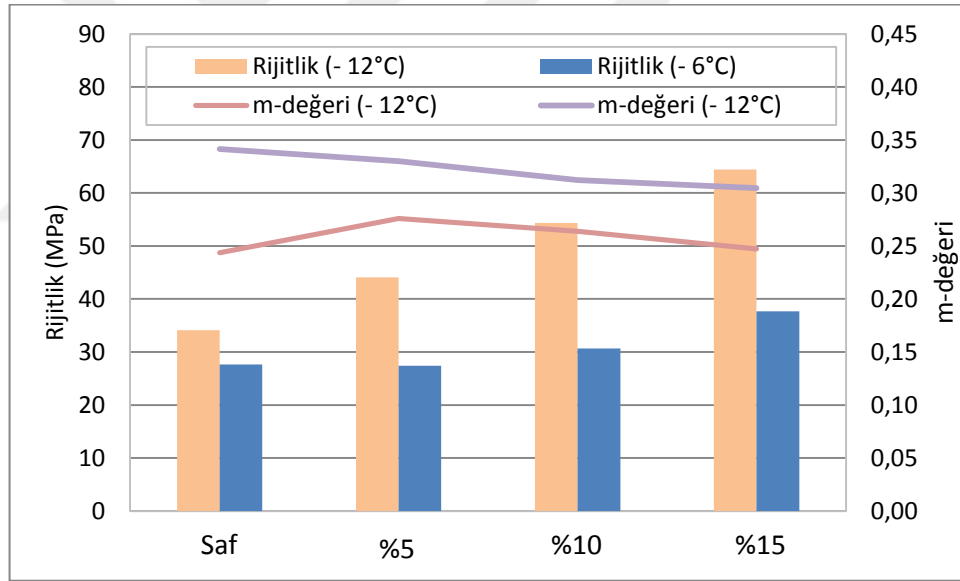
Superpave sistemine göre bağlayıcıların yüksek sıcaklık seviyeleri belirlendikten sonra düşük sıcaklık değerleri BBR ve DSR deneyleri ile belirlenmiştir (Şekil 4.19).

**Sekil 4.19.** Superpave PG tablosu (Zaniewski ve Pumphrey, 2004)

BBR deneyi öncelikle -12°C sıcaklıkta uygulanmıştır (Şekil 4.20). Superpave şartnamesine göre deney sıcaklığında bağlayıcının rijitlik değeri 300 MPa'dan az olması gerekmektedir. Ayrıca m-değeri 0,300'den büyük olmalıdır.

-12°C sıcaklıkta bağlayıcıların rijitlik değerleri 300 MPa'dan düşük çıkmıştır. Fakat m-değerlerinin 0,300'den az olduğu tespit edilmiştir. Bu nedenle şartnameye uygun olarak deneyler -6°C sıcaklıkta tekrarlanmıştır. -6°C sıcaklıkta yapılan deneyler sonucunda bağlayıcıların rijitlik değerlerinin 300 MPa'dan az olduğu, m-değerlerinin de 0,300'den büyük olduğu tespit edilmiştir. Dolayısıyla bütün bağlayıcılar -6°C sıcaklıkta şartname gereksinimlerini sağlamıştır.

Elde edilen sonuçlardan saf ve %5 modifiyeli bitümlerin performans seviyelerinin PG 58-16 olduğu, %10 ve %15 aktif karbon modifiyeli bitümlerin ise PG 64-16 performans seviyesine sahip oldukları tespit edilmiştir.



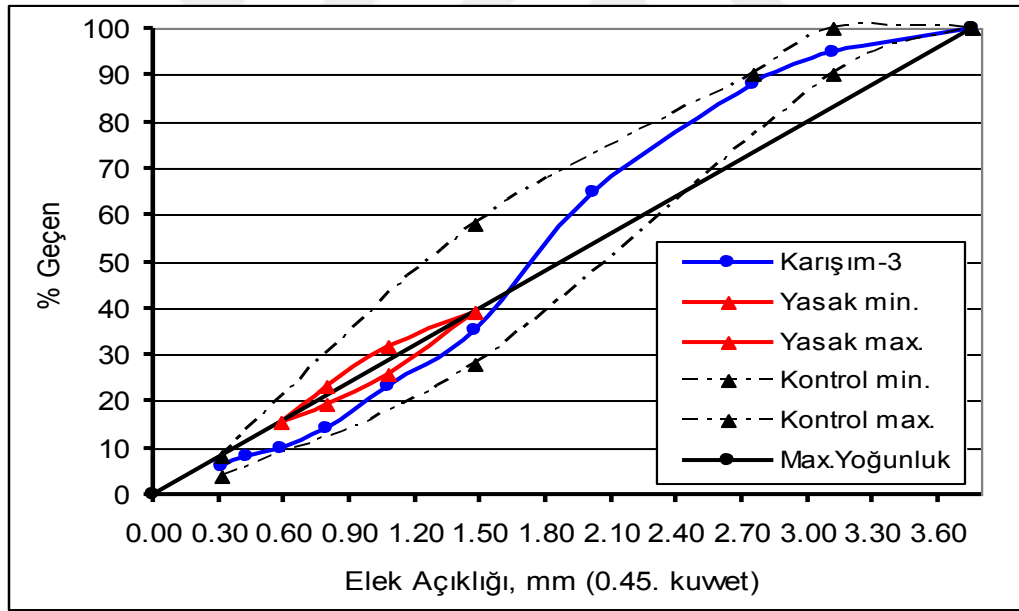
Şekil 4.20. Bağlayıcıların BBR deney sonuçları

#### 4.3. Agrega Deney Sonuçları

Bitümlü sıcak karışımların iskeletini oluşturan agregalar malzemesi olarak kırmataş kalker kullanılmıştır. Agregalar malzemesi Elazığ'ın Karayazı Bölgesi'nde bulunan Elkisan Şirketi'nden temin edilmiştir. Kullanılan agreganın özellikleri Tablo 4.7.'de verilmiştir. Ayrıca kullanılan gradasyon Şekil 4.21'de verilmiştir.

**Tablo 4.7.** Kırmataş kalkerin özellikleri (Yamaç, 2015)

| Özellikler                                                                                  | Mineral Agrega |      |        | Şartname Sınırı |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|------|--------|-----------------|
|                                                                                             | Kaba           | İnce | Filler |                 |
| Parçalanma Direnci (Los Angeles), (%)<br>(TS EN 1097-2)                                     | 29.2           | -    | -      | Maks. 30        |
| Aşınma Direnci (Mikro-Deval), (%)<br>(TS EN 1097-1)                                         | 17.4           | -    | -      | Maks. 25        |
| Hava Tesirlerine Karşı Dayanıklılık<br>(MgSO <sub>4</sub> ile kayıp), (%)<br>(TS EN 1367-4) | 16.7           | -    | -      | Maks. 18        |
| Metilen Mavisi (gr/kg)<br>(TS EN 933-9)                                                     | -              | 0.5  | -      | Maks. 1.5       |



**Şekil 4.21.** Çalışmada kullanılan agreg gradasyonu

#### 4.4. Bitümlü Sıcak Karışımlar Üzerinde Uygulanan Deneyler

##### 4.4.1. Karışımların Hacimsel Özelliklerinin ve Marshall Deney Sonuçlarının

##### Değerlendirilmesi

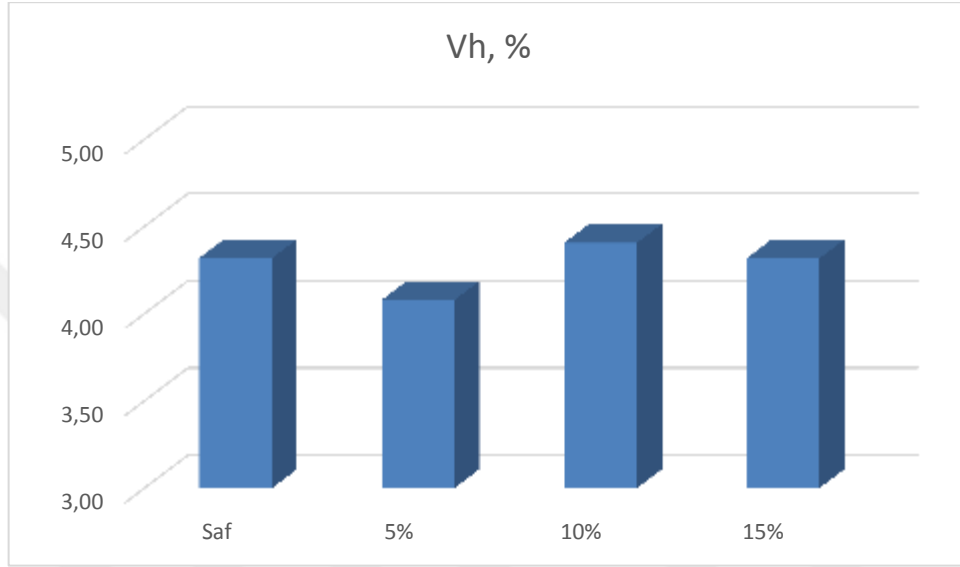
Çalışmada saf bağlayıcı için Marshall yöntemine göre optimum bitüm içeriği belirlenmiştir. Saf bağlayıcı için optimum bitüm içeriği %4,9 olarak belirlenmiştir. Modifiye bitümlerle hazırlanan karışımlarda bitümlü bağlayıcı oranının deney sonuçlarına etki etmesini engellemek amacıyla aynı bitüm içeriği (%4,9) kullanılmıştır. Saf ve 3 farklı oranda aktif karbon içeren modifiye bitüm ile hazırlanan karışımlardan elde edilen değerler Karayolları Teknik Şartnamesi aşınma tabakası tip-1 ve tip-2 kriterleri ile karşılaştırılmıştır (Tablo 4.8).

**Tablo 4.8.** Asfalt betonu dizayn kriterleri (KTŞ, 2013)

| Özellikler                                                                                                                    | Binder |        | Aşınma<br>TİP-1, TİP-2 |        | Aşınma<br>TİP-3 |        | Deney<br>Standartı |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|--------|------------------------|--------|-----------------|--------|--------------------|
|                                                                                                                               | min.   | maks.  | min.                   | maks.  | min.            | maks.  |                    |
| Briket Yapımında Uygulanacak Darbe Sayısı                                                                                     | 75     |        | 75                     |        | 75              |        | TS EN 12697-30     |
| Marshall Stabilitesi, kg                                                                                                      | 750    | -      | 900                    | -      | 400             | -      | TS EN 12697-34     |
| Boşluk, %                                                                                                                     | 4      | 6      | 3                      | 5      | 5               | 12     | TS EN 12697-8      |
| Asfaltla Dolu Boşluk, %                                                                                                       | 60     | 75     | 65                     | 75     | -               | -      | TS EN 12697-8      |
| Agregalar Arası Boşluk, (VMA) %                                                                                               | 13     | 15     | 14                     | 16     | -               | -      | TS EN 12697-8      |
| Akma, mm (10 <sup>-2</sup> in)                                                                                                | 2 (8)  | 4 (16) | 2 (8)                  | 4 (16) | 2 (8)           | 4 (16) | TS EN 12697-34     |
| Filler/Bitüm Oranı                                                                                                            | -      | 1,4    | -                      | 1,5    |                 |        |                    |
| Bitüm (ağırlıkça, 100'e)                                                                                                      | 3,5    | 6,5    | 4,0                    | 7,0    | 5,0             | 8,0    | TS EN 12697-1      |
| Sıkıştırılmış Bitümlü Karışımların Sudan Kaynaklanan Bozulmalara Karşı Direnci, İndirekt Çekme Mukavemeti (İÇM) Oranı, min. % | 80     |        | 80                     |        | 80              |        | AASHTO T 283       |
| Tekerlek İzinde Oturma (30.000 devirde, 60 °C'de), maks. %                                                                    | -      |        | 8                      |        | -               |        | TS EN 12697-22     |
| Tekerlek İzinde Oturma (3.000 devirde, 60 °C'de 5 cm kalınlığında numune), maks. %                                            |        |        |                        |        | 7               |        | TS EN 12697-22     |
| Not: Tabakalar arası yapışma dayanımı TS EN 12697-48'e göre yapılabilir.                                                      |        |        |                        |        |                 |        |                    |

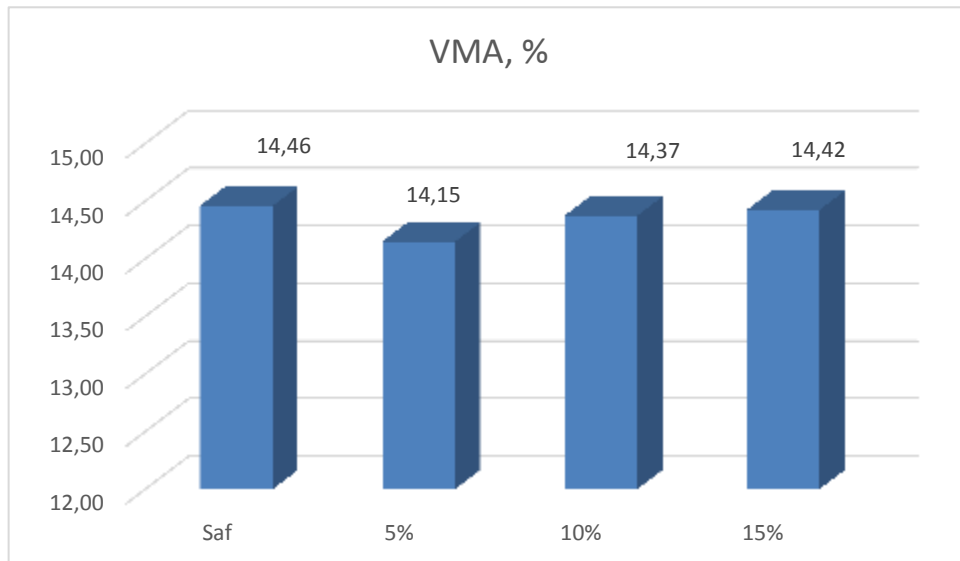
Şekil 4.22 – 4.27’de karışımlardan elde edilen değerler gösterilmiştir.

Karayolları Teknik Şartnamesi Tip-1 ve Tip-2 karışımları için aşınma tabakasında kullanılacak bitümlü sıcak karışımların boşluk oranı ( $V_h$ ) değerlerinin %3-5 arasında olması gerekmektedir. %4,9 bitüm içeriğinde hazırlanan karışımların  $V_h$  değerleri incelendiğinde bütün karışımların şartname kriterlerini sağladığı belirlenmiştir. (Şekil 4.22)



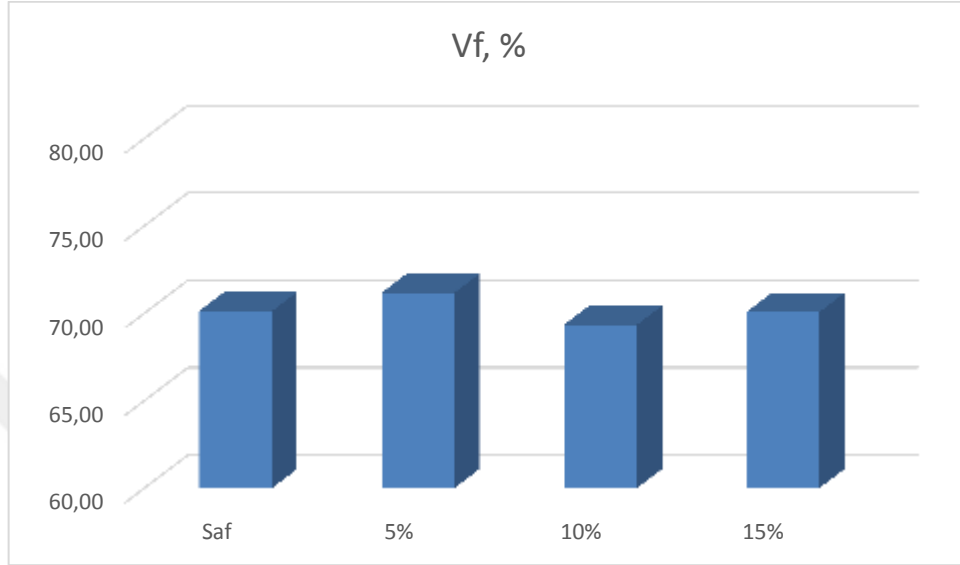
Şekil 4.22. Karışımların boşluk oranının katkı içeriği ile değişimi

Karayolları Teknik Şartnamesi’ne göre karışımların agregalar arası boşluk oranı değerleri %14-16 arasında olmalıdır. Şekil 4.23’te görüldüğü üzere bütün karışımların VMA değerleri %14-16 arasında olduğundan şartname kriterlerini sağlamıştır.

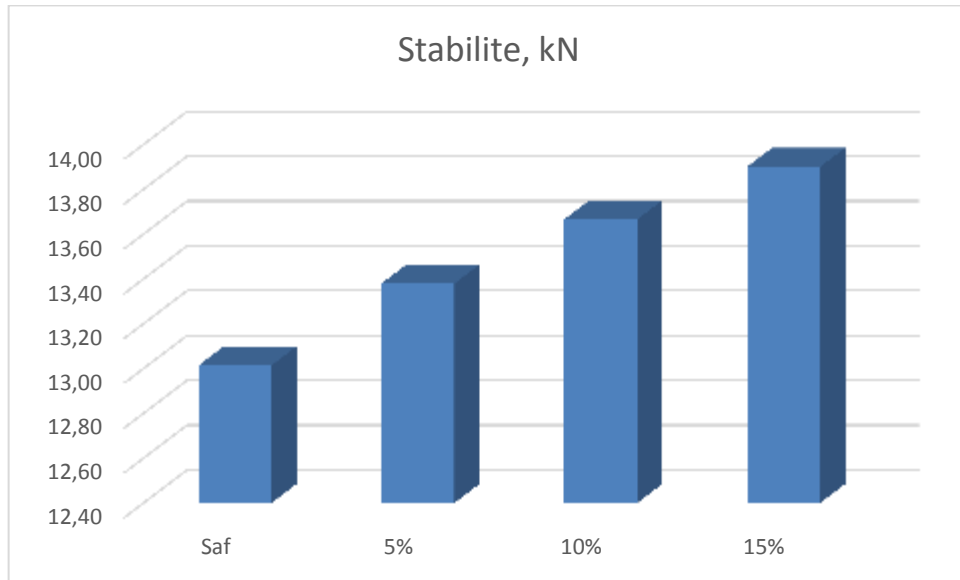


Şekil 4.23. Karışımların agregalar arası boşluk oranının katkı içeriği ile değişimi

Şekil 4.24.'de görüldüğü üzere karışımların bitümle dolu boşluk oranı değerleri incelendiğinde KTŞ limitleri olan %65-75 aralığında olduğu dolayısıyla bütün karışımların şartname kriterlerini sağladığı tespit edilmiştir.



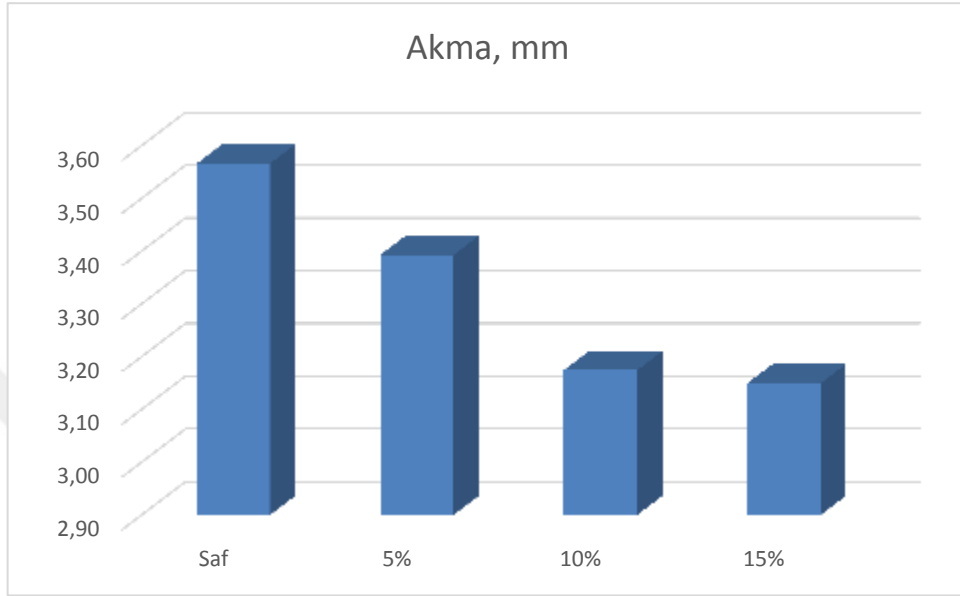
Şekil 4.24. Karışımların bitümle dolu boşluk oranı değerlerinin katkı içeriği ile değişimi



Şekil 4.25. Karışımların stabilite değerlerinin katkı içeriği ile değişimi

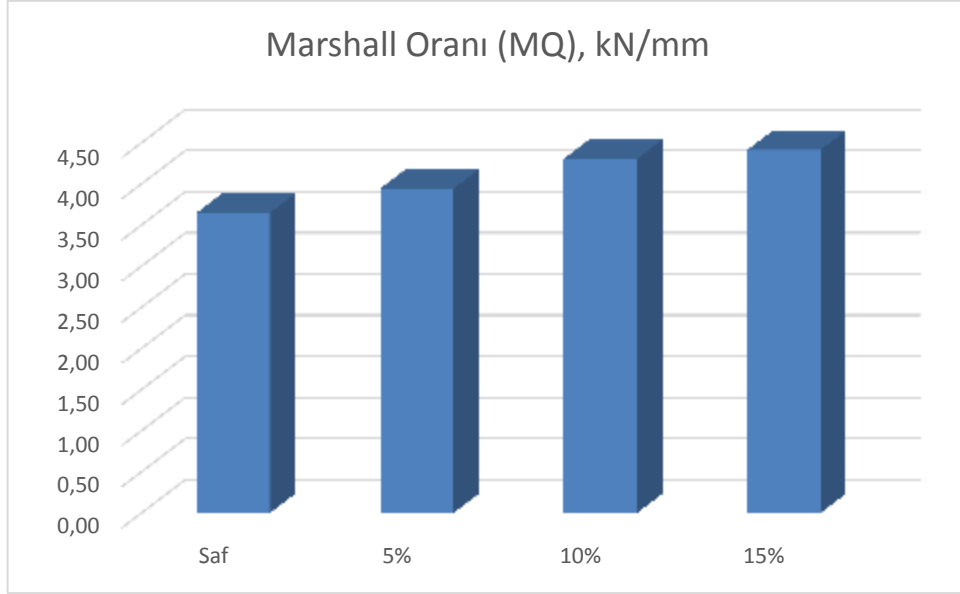
Şekil 4.26'da görülen maksimum yük anındaki deformasyon değeri olan akma değerleri incelendiğinde katkı içeriğinin artmasıyla akma değerlerinin düzenli olarak azaldığı, KTŞ şartname kriteri olan 2-4 mm aralığını sağladığı belirlenmiştir. %5, %10

ve %15 oranlarında aktif karbon içeren modifiye bitümlerle hazırlanan karışımların akma değerlerinin saf bağlayıcı ile hazırlanan karışıma göre sırasıyla %4,86 ; %10,98 ve %11,67 oranlarında daha düşük olduğu belirlenmiştir.



**Şekil 4.26.** Karışımların akma değerlerinin katkı içeriği ile değişimi

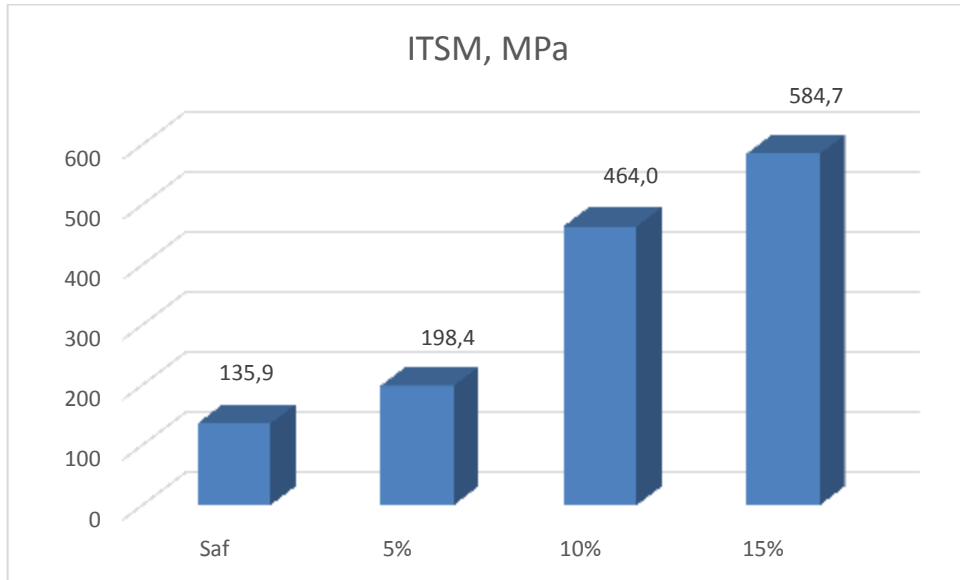
Bitümlü sıcak karışımların kalıcı deformasyona karşı dayanımlarının bir göstergesi olan Marshall oranı (MQ) değerleri Şekil 4.27’de verilmiştir. Bu değerler incelendiğinde, bitüm modifikasyonunda kullanılan aktif karbon içeriği arttıkça MQ değerinin arttığı belirlenmiştir. %5, %10 ve %15 oranlarında aktif karbon içeren modifiye bitümlerle hazırlanan karışımların Marshall oranı değerlerinin saf bağlayıcı ile hazırlanan karışıma göre sırasıyla %8,06 ; %17,96 ve %20,93 oranlarında daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Elde edilen MQ değerlerinden bitüm modifikasyonunda aktif karbon kullanılması ile bitümlü sıcak karışımların kalıcı deformasyona karşı dayanımlarının önemli oranda arttığı tespit edilmiştir.



Şekil 4.27. Karışımların Marshall Oranı (MQ) değerlerinin katkı içeriği ile değişimi

#### 4.4.2. İndirekt Çekme Rijitlik Modülü Deney Sonuçları

Tez kapsamında %4,9 bitüm içeriğinde hazırlanan bitümlü sıcak karışım numunelerine ASTM D4123 standardına uygun olarak indirekt çekme rijitlik modülü deneyi uygulanmıştır. Deneyde, hedef deformasyon 5µm olarak seçilmiştir. 25°C sıcaklıkta yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar Şekil 4.28’de görülmektedir.



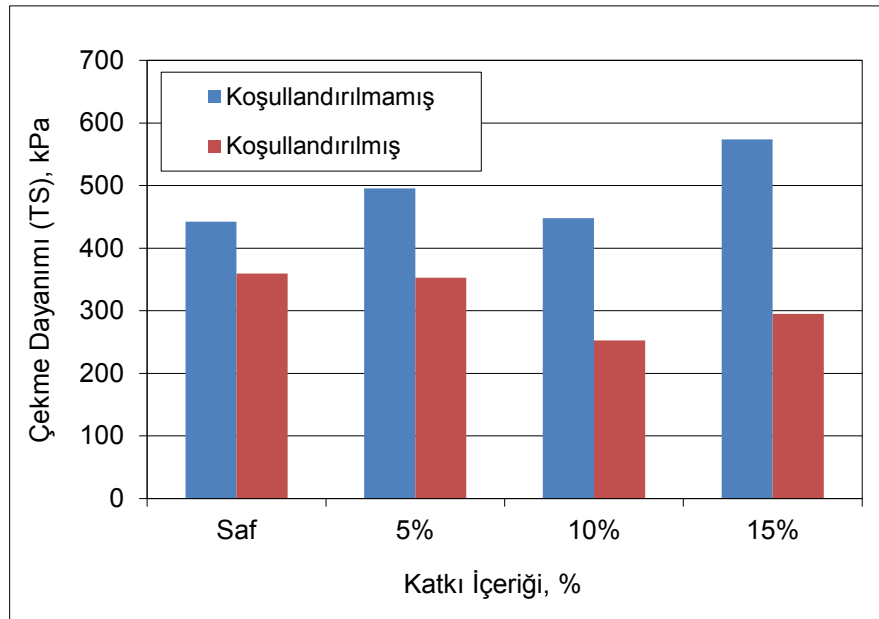
Şekil 4.28. Karışımların ITSM değerlerinin aktif karbon içeriği ile değişimi



Şekil 4.28’te görüldüğü üzere bitüm modifikasyonunda aktif karbon kullanılması ile ITSM değerleri artmıştır. %5 aktif karbon kullanımının etkisinin az olmasına rağmen %10 ve %15 oranlarında kullanım önemli oranda rijitlik modülünü arttırmıştır. Bitüm modifikasyonunda %5, %10 ve %15 oranlarında aktif karbon kullanılması ile bitümlü sıcak karışımların rijitlik modülü değerleri saf bitümle hazırlanan karışımlara göre sırasıyla %45,9 ; %241,4 ve %330,2 oranlarında arttığı tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlardan bitüm modifikasyonunda özellikle %10 ve %15 oranlarında aktif karbon kullanımının bitümlü sıcak karışımların rijitlik modülünü önemli oranda arttırdığı tespit edilmiştir.

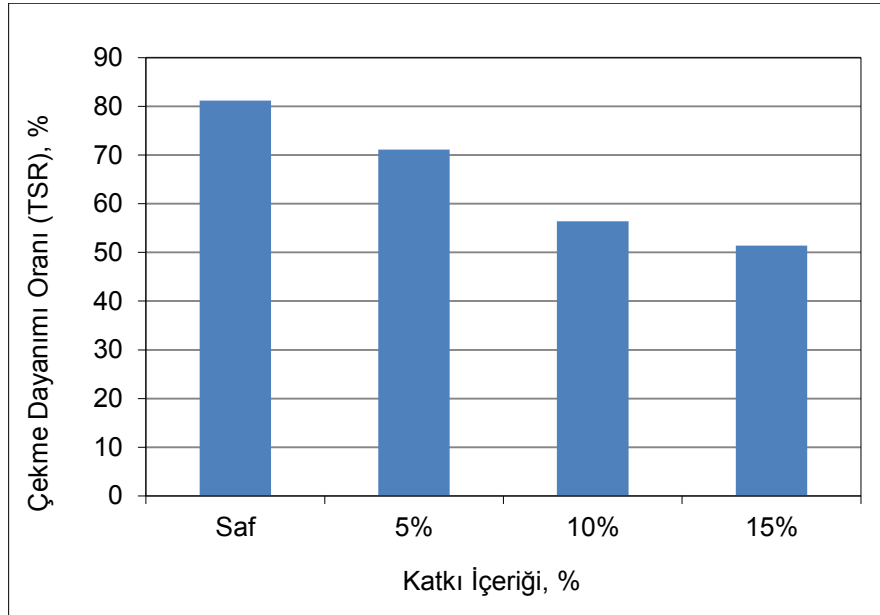
#### 4.4.3. Nem Hasarına Karşı Dayanım Deney Sonuçları

Tez çalışmasında bitümlü sıcak karışımların nem hasarına karşı dayanımları AASHTO T283 standardına uygun olarak belirlenmiştir. Saf bitüm ve %5, %10 ve %15 modifiye bitümle %4,9 bitüm içeriğinde hazırlanan karışımlar  $7 \pm 0,5$  hava boşluğunda olacak şekilde hazırlanmıştır. Her bir karışım türü için 6 adet numune hazırlanmış olup hacim özgül ağırlıkları eşit olacak 3 numunelik 2 gruba ayrılmıştır. 1. grup standarda uygun olarak koşullandırma işlemine tabi tutulurken 2. grup 25°C sıcaklıkta 2 saat bekletildikten sonra kırılmıştır. Koşullandırılmış ve koşullandırılmamış karışımların çekme dayanımı değerleri Şekil 4.29’da görülmektedir.



Şekil 4.29. Karışımların çekme dayanımı değerlerinin katkı içeriği ile değişimi

Şekil 4.29.'da görüldüğü üzere koşullandırma öncesinde en düşük çekme dayanımı değerine saf karışımın sonrasında ise %10 aktif karbon içeren modifiye bitümle hazırlanan karışımın sahip olduğu, en yüksek değere ise %15 aktif karbon içeren modifiye bitümle hazırlanan karışımın sahip olduğu belirlenmiştir. Koşullandırılmamış numunelerde bitüm modifikasyonunda %5, %10 ve %15 oranlarında aktif karbon kullanılması ile bitümlü sıcak karışımların çekme dayanımları sırasıyla %12,0 ; %1,2 ve %29,6 oranlarında artmıştır. Koşullandırma nedeni ile karışımların çekme dayanımları azalmıştır. Koşullandırma sonrasında en yüksek değere saf bağlayıcı ile hazırlanan karışımın, en düşük değere ise %10 aktif karbon modifiyeli bitüm ile hazırlanan karışımın sahip olduğu belirlenmiştir. Koşullandırma sonrasında saf bağlayıcı ile hazırlanan karışımın çekme dayanımı değerinin %5, %10 ve %15 aktif karbon içeren modifiye bitümlerle hazırlanan karışımların çekme dayanımı değerlerine göre sırasıyla %1,8; %29,7 ve %17,9 oranında daha düşük olduğu belirlenmiştir. Bu durum, koşullandırmanın bitüm modifikasyonunda aktif karbon kullanımının çekme dayanımı değerleri üzerinde olumsuz etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Nem hasarına karşı dayanımın göstergesi olan çekme dayanımı oranı (TSR) değerlerinin katkı türü ile değişimi Şekil 4.30'da görülmektedir.



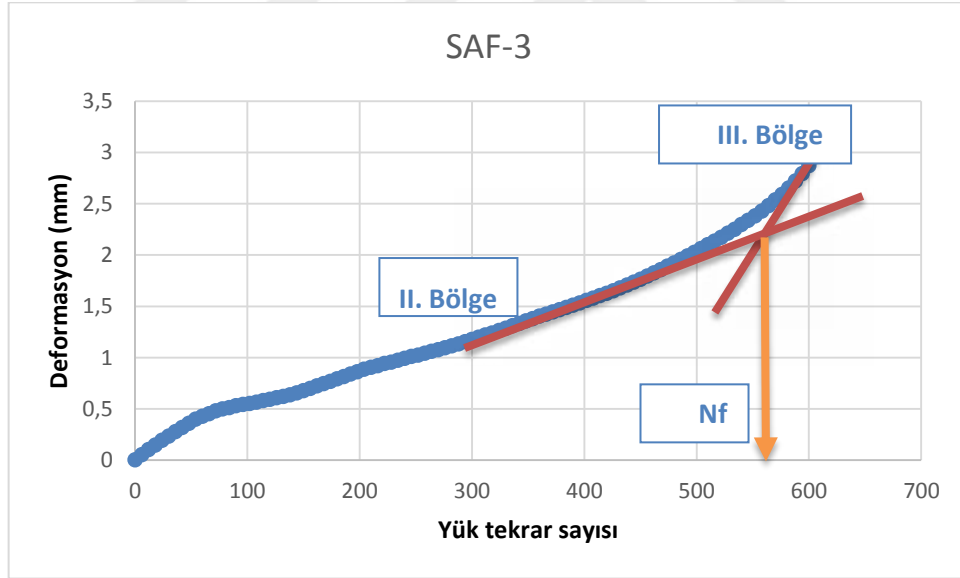
Şekil 4.30. Çekme dayanımı oranı değerlerinin katkı içeriği ile değişimi

Şekil 4.30'da görüldüğü üzere bitüm modifikasyonunda kullanılan aktif karbon içeriği arttıkça nem hasarına karşı dayanım değerleri azalmıştır. Karışımlardan sadece

saf bağlayıcı ile hazırlanan karışım %80 değerini sağlamıştır. En yüksek TSR değerine saf bağlayıcı ile hazırlanan karışımın en düşük değere ise %15 aktif karbon içeren modifiye bitümle hazırlanan bitümlü sıcak karışımların sahip olduğu tespit edilmiştir. Bitüm modifikasyonunda %5, %10 ve %15 oranlarında aktif karbon kullanılması durumunda TSR değeri sırasıyla %12,4; %30,5 ve %36,7 oranlarında azalmıştır. Elde edilen sonuçlardan bitüm modifikasyonunda aktif karbon kullanımının bitümlü sıcak karışımların nem hasarına karşı dayanımını olumsuz etkilediği belirlenmiştir.

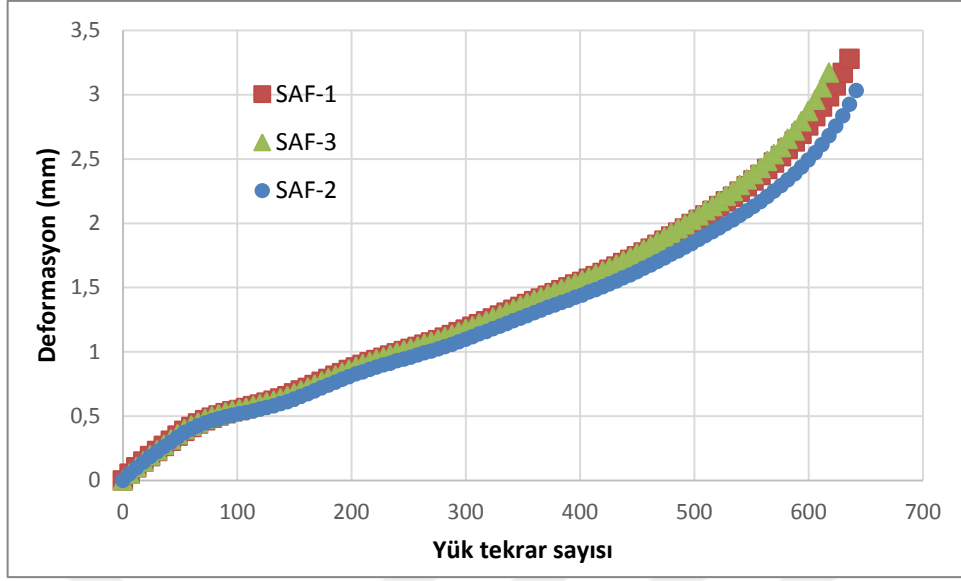
#### 4.4.4. İndirekt Çekme Yorulma Deney Sonuçları

Çalışmada UTM kullanılarak 25°C sıcaklıkta indirekt çekme yorulma deneyi uygulanmıştır. Deney gerilme kontrollü uygulanmış olup bütün numunelere 200 kPa gerilme altında tekrarlı yükleme yapılmıştır. Deneyler numuneler kırılıncaya kadar devam ettirilmiştir. Yorulma ömrü değerleri grafiklerin 2. ve 3. bölge teğetlerinin kesişim noktalarından elde edilmiştir. Yorulma ömrü belirlenmesine örnek Şekil 4.31’de görülmektedir.

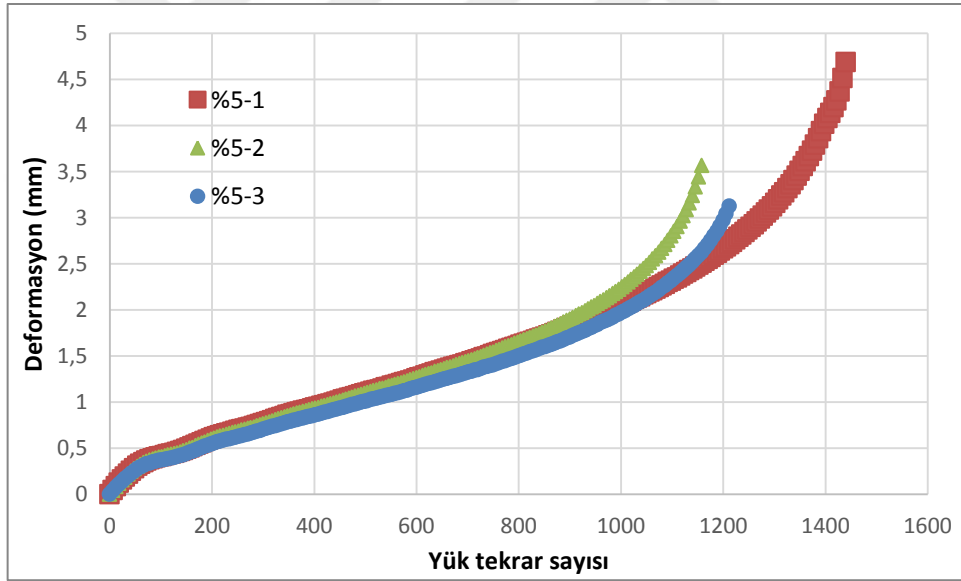


Şekil 4.31. Nf değerlerinin belirlenmesi

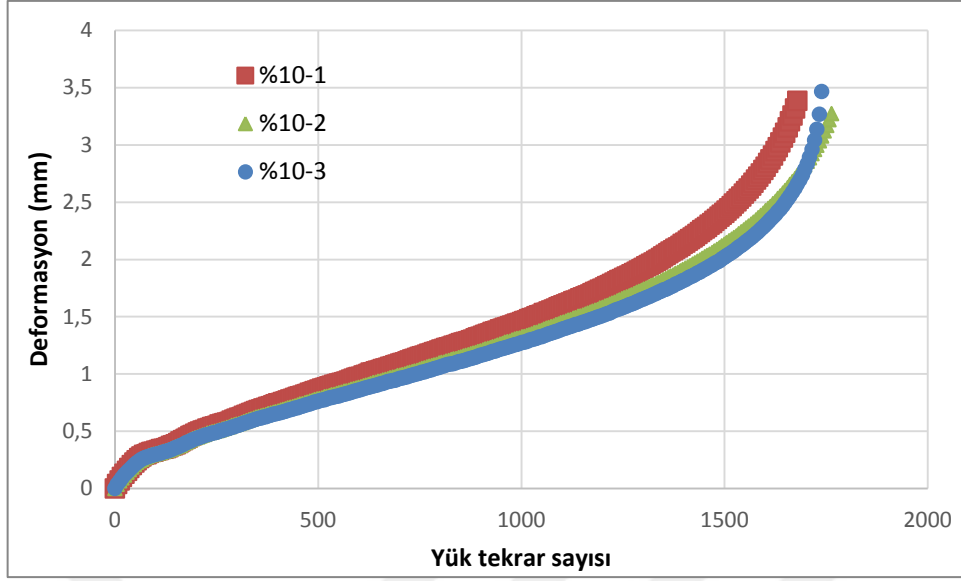
Her bir karışım türünden 3 adet numune deneye tabi tutulmuştur. Saf bitüm, %5, %10 ve %15 oranlarında aktif karbon içeren modifiye bitümlerle hazırlanan karışımlara uygulanan yorulma deneylerinden elde edilen yük tekrar sayısı – deformasyon grafikleri Şekil 4.32-4.35’te görülmektedir.



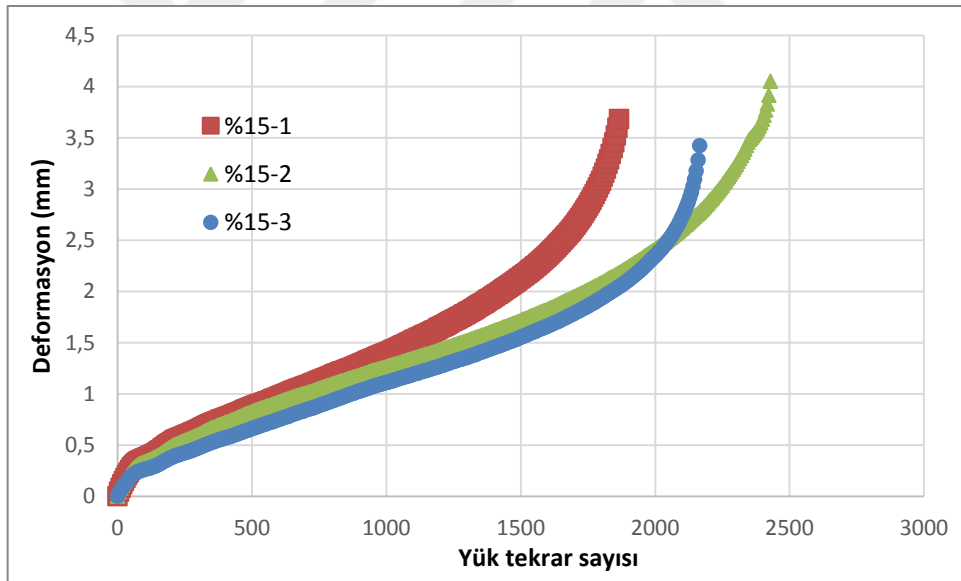
Şekil 4.32. Saf bağlayıcı ile hazırlanan karışımların deformasyon-yük tekrar sayısı ilişkisi



Şekil 4.33. %5 aktif karbon modifiyeli bağlayıcı ile hazırlanan karışımların deformasyon-yük tekrar sayısı ilişkisi

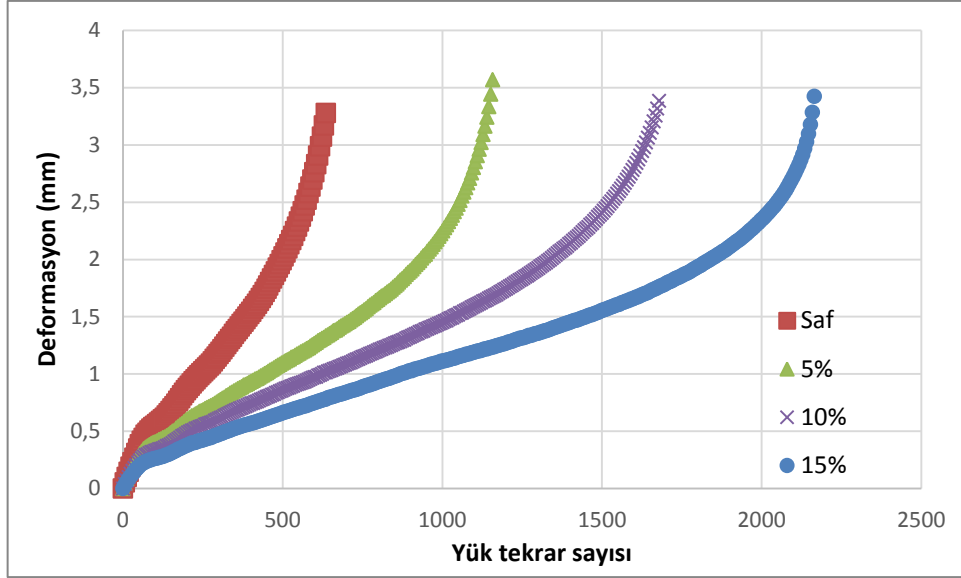


Şekil 4.34. %10 aktif karbon modifiyeli bağlayıcı ile hazırlanan karışımların deformasyon-yük tekrar sayısı ilişkisi



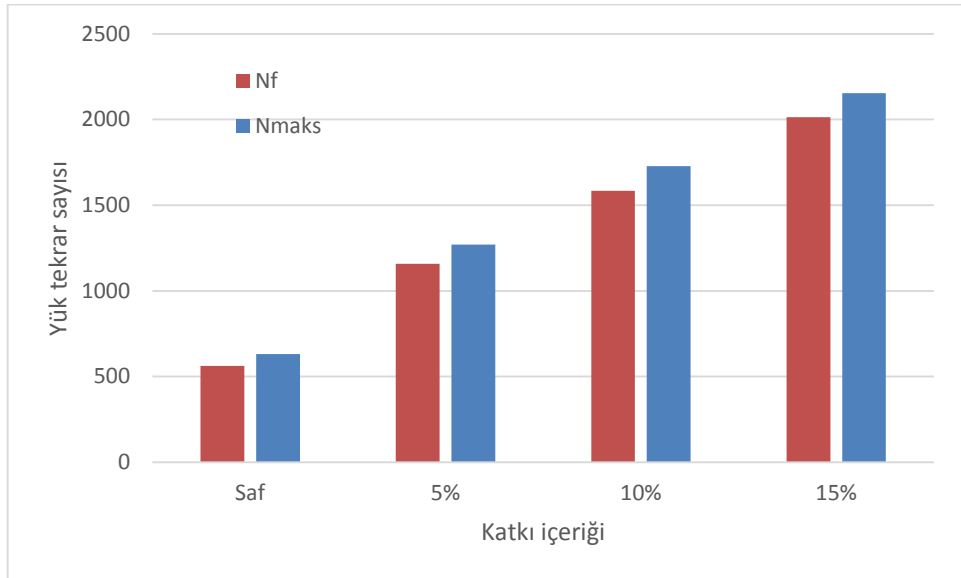
Şekil 4.35. %15 aktif karbon modifiyeli bağlayıcı ile hazırlanan karışımların deformasyon-yük tekrar sayısı ilişkisi

Şekil 4.36’da görüldüğü üzere katkı kullanımı ile bitümlü sıcak karışımların yorulma ömürleri önemli oranda artmış olup katkı içeriği arttıkça yorulma ömründeki iyileşme düzenli olarak artmıştır.



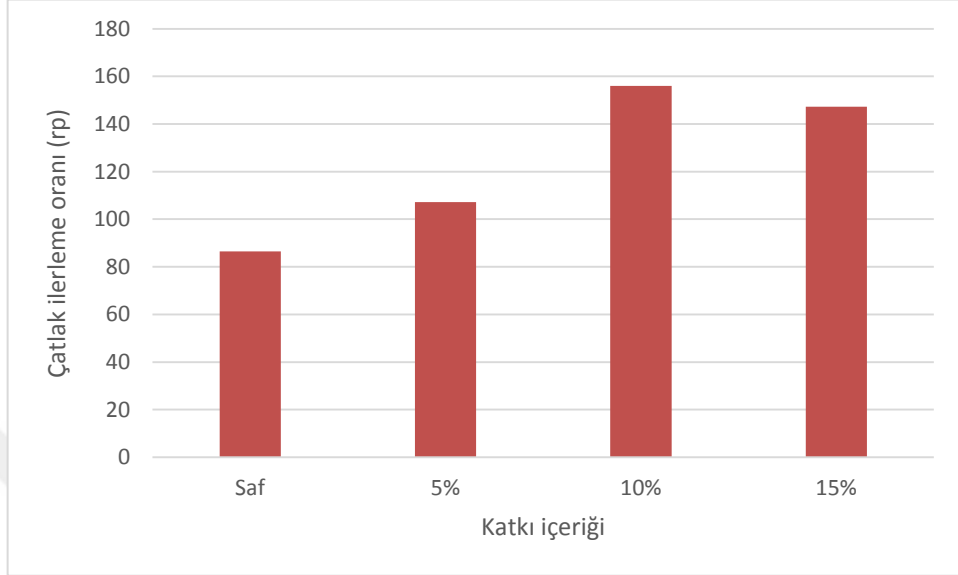
**Şekil 4.36.** Saf ve aktif karbon modifiyeli bağlayıcı ile hazırlanan karışımların deformasyon-yük tekrar sayısı ilişkisi

Şekil 4.37’de görüldüğü üzere  $N_f$  ve  $N_{maks}$  değerleri benzer şekilde değişmiştir. %5, %10 ve %15 aktif karbon modifiye bitümlerle hazırlanan bitümlü sıcak karışımların yorulma ömrü ( $N_f$ ) değerlerinin saf bağlayıcı ile hazırlanan karışımların yorulma ömrü değerinden sırasıyla 2,06 kat, 2,82 kat ve 3,58 kat daha yüksek olduğu belirlenmiştir.



**Şekil 4.37.**  $N_f$  ve maksimum yük tekrar sayılarının katkı içeriği ile değişimi

Bitümlü sıcak karışımlarda çatlak oluşuktan sonra her 1 mm deformasyon oluşması için gerekli yük tekrar sayısını gösteren çatlak ilerleme oranı (rp) değerlerinin katkı içeriği ile değişimi Şekil 4.38’te görülmektedir.

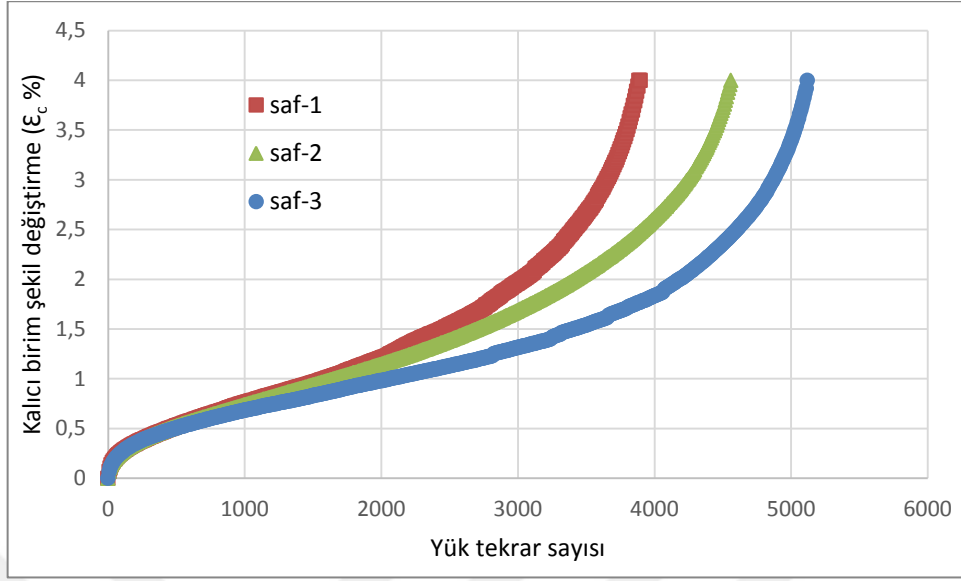


Şekil 4.38. Çatlak ilerleme oranı değerlerinin katkı oranı ile değişimi

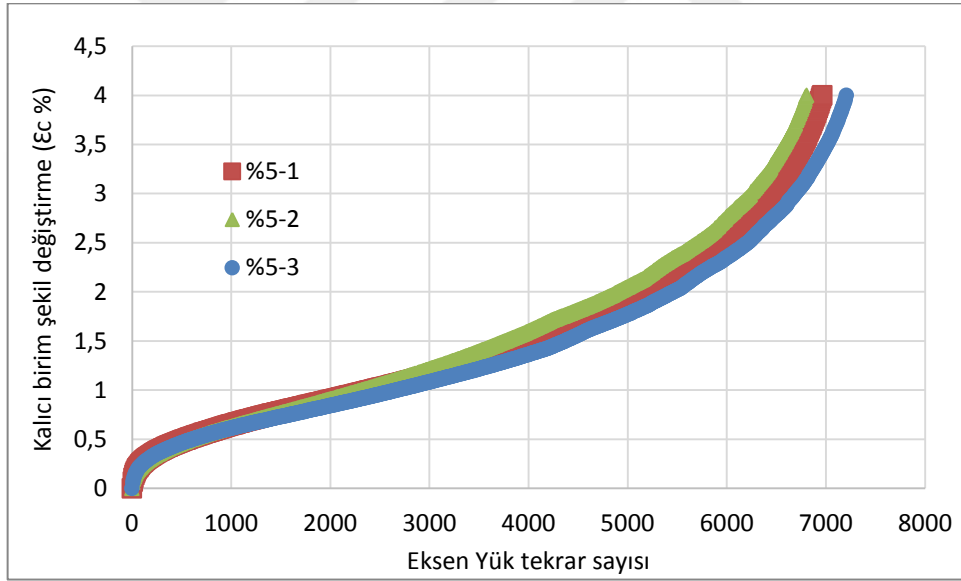
Şekil 4.38.’te görüldüğü üzere bitüm modifikasyonunda aktif karbon kullanımı ile çatlak ilerleme oranı artmıştır. En düşük değere saf bağlayıcı ile hazırlanan karışımın en yüksek değerine ise %10 aktif karbon modifiyeli bitüm kullanılarak hazırlanan karışımların sahip olduğu belirlenmiştir. %15 aktif karbon modifiyeli bitüm ile hazırlanan karışımın çatlak ilerleme oranının %10 aktif karbon modifiye bitüm ile hazırlanan karışımından düşük olması bu karışımın daha rijit olmasından ve çatlağın daha hızlı ilerlemesinden kaynaklanmıştır. %5, %10 ve %15 aktif karbon modifiye bitümlerle hazırlanan bitümlü sıcak karışımların çatlak ilerleme oranı (rp) değerlerinin saf bağlayıcı ile hazırlanan karışımların çatlak ilerleme oranı değerinden sırasıyla 1,24 kat, 1,80 kat ve 1,70 kat daha yüksek olduğu belirlenmiştir.

#### 4.4.5. Dinamik Sünme Deney Sonuçları

UTM cihazının iklimlendirme kabini 50°C sıcaklığa ayarlanmış, en az 3 saat deney sıcaklığında iklimlendirme kabininde bekletilmiştir. Ardından 500 ms dinlenme ve 1000 ms yük etki süresi yükleme periyodunda 400 kPa gerilme altında tekrarlı yükleme yapılmıştır. Deneyler, numunelerdeki kalıcı birim şekil değiştirme ( $\epsilon_c$ ) %4’e ulaşıncaya veya 8000 yük tekrarına ulaşıncaya kadar devam edilmiştir. Her bir karışım türünden 3 numune deneye tabi tutulmuş olup elde edilen grafikler Şekil 4.39 - 4.42’de verilmiştir.

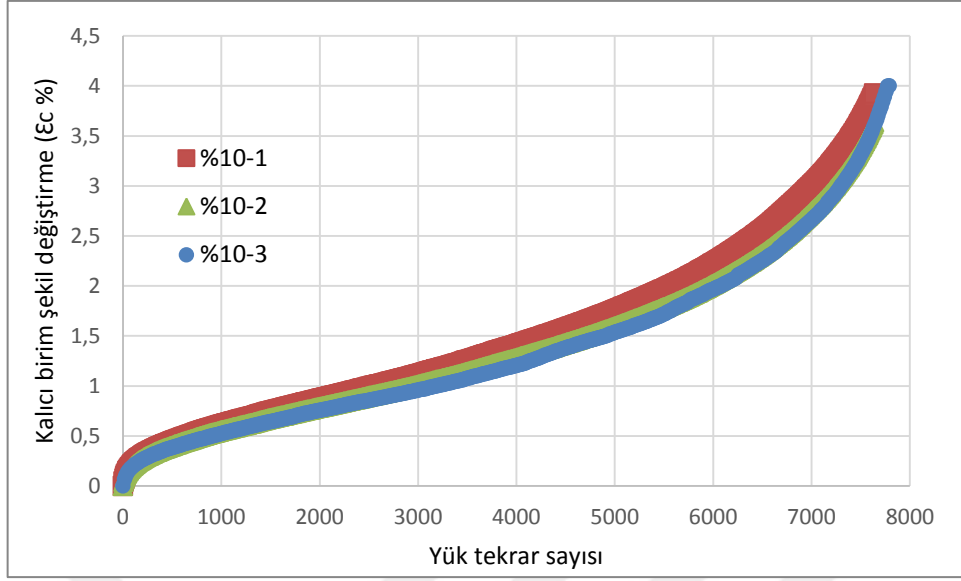


Şekil 4.39. Saf bağlayıcı ile hazırlanan karışımların  $\epsilon_c$  – yük tekrar sayısı ilişkisi

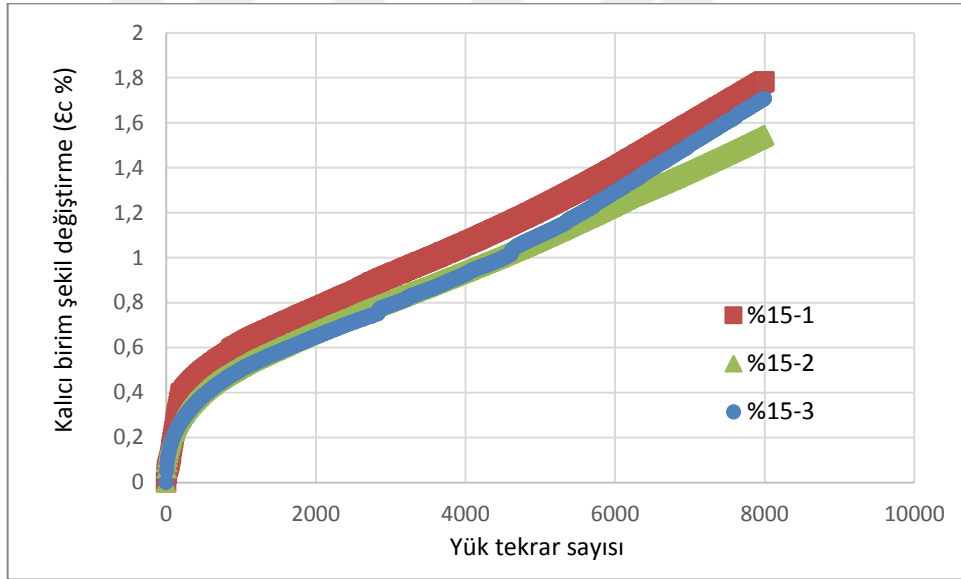


Şekil 4.40. %5 aktif karbon içeren modifiye bağlayıcı ile hazırlanan karışımların  $\epsilon_c$  – yük tekrar sayısı ilişkisi



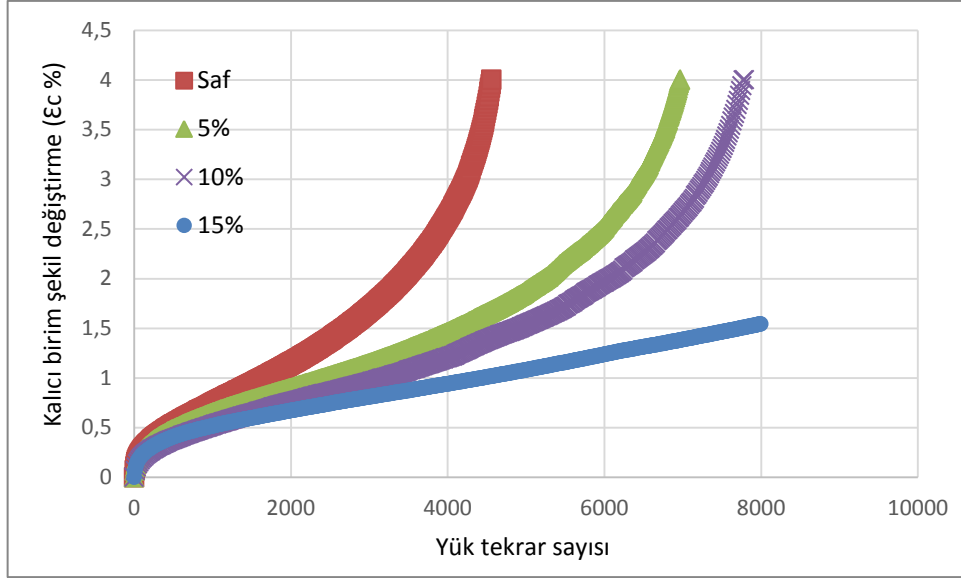


**Şekil 4.41.** %10 aktif karbon içeren modifiye bağlayıcı ile hazırlanan karışımların  $\epsilon_c$  – yük tekrar sayısı ilişkisi



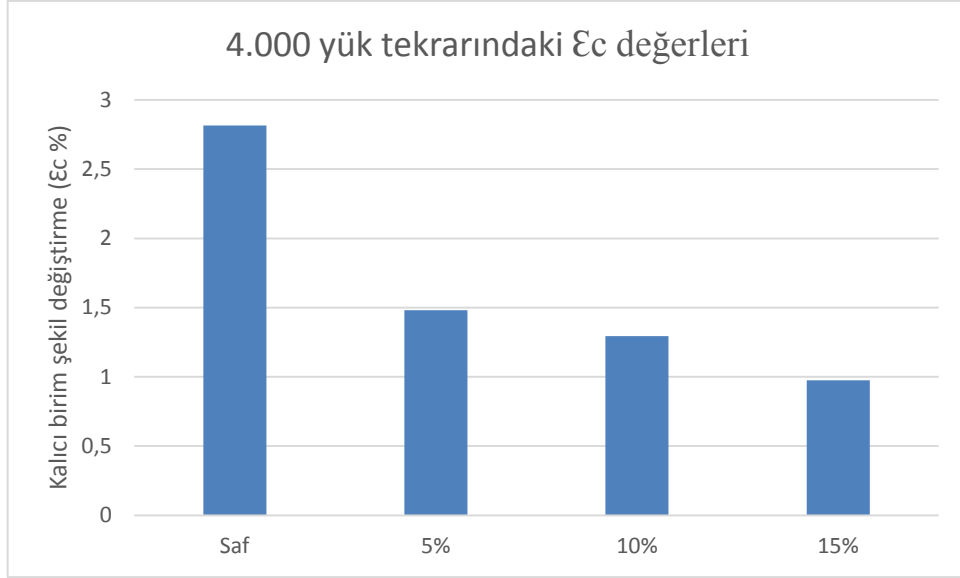
**Şekil 4.42.** %15 aktif karbon içeren modifiye bağlayıcı ile hazırlanan karışımların  $\epsilon_c$  – yük tekrar sayısı ilişkisi

Farklı karışım örneklerinin kalıcı birim şekil değiştirme değerlerinin yük tekrar sayısı ile değişimi Şekil 4.43'te görülmektedir.



**Şekil 4.43.** Farklı karışımların  $E_c$  – yük tekrar sayısı ilişkisi

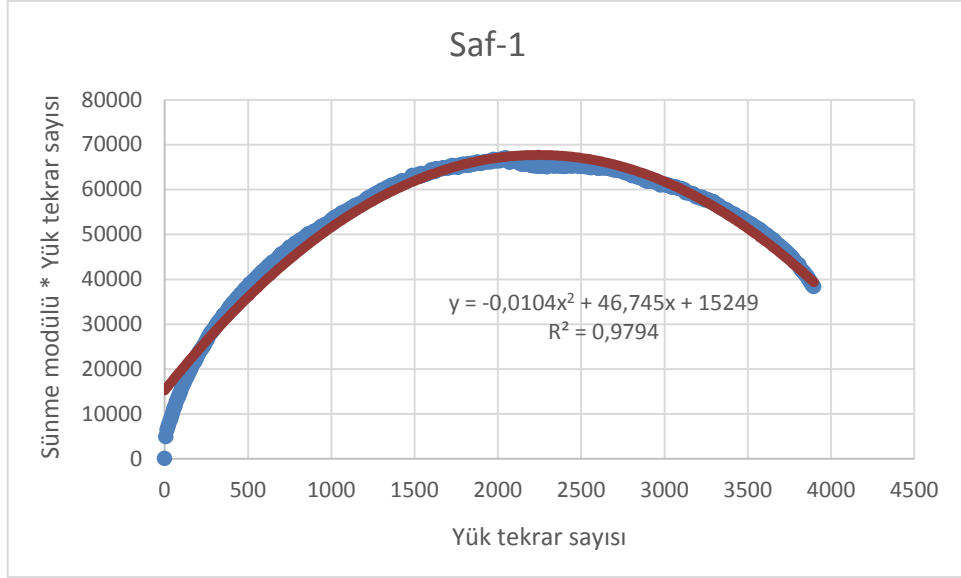
Şekil 4.43.'te görüldüğü üzere bitüm modifikasyonunda %5 ve %10 aktif karbon kullanılması ile bitümlü sıcak karışımlarda %4 kalıcı birim şekil değiştirme meydana gelmesi için uygulanması gereken yük tekrar sayısı önemli oranda artmıştır. %15 katkı içeren modifiye bitümlerde hazırlanan karışımlarda 8000 yük tekrarı bile 3. bölgeye geçilmemiş, diğer karışımlara göre çok düşük oranda kalıcı birim şekil değiştirme meydana gelmiştir. %4 birim şekil değiştirme meydana gelmesi için saf bağlayıcı ile hazırlanan karışımlarda ortalama 4525 yük tekrarı gerekirken, %5 aktif karbon modifiyeli bitümle hazırlanan karışımlarda 6995 yük tekrarı (saf karışıma göre 1,55 kat daha fazla), %10 aktif karbon modifiyeli bitümle hazırlanan karışımlarda ortalama 7749 yük tekrarı (saf karışıma göre 1,71 kat daha fazla) gerekmiştir. Bütün karışımları karşılaştırmak amacıyla bütün karışımların kalıcı birim şekil değiştirme değerlerinin karşılaştırılabileceği 4000 yük tekrarındaki  $E_c$  değerleri karşılaştırılmıştır (Şekil 4.44). Şekildeki değerler 3 numuneden alınan değerlerin ortalamasıdır.



**Şekil 4.44.** Karışımların 4.000 yük tekrarı sonundaki  $\epsilon_c$  değerleri

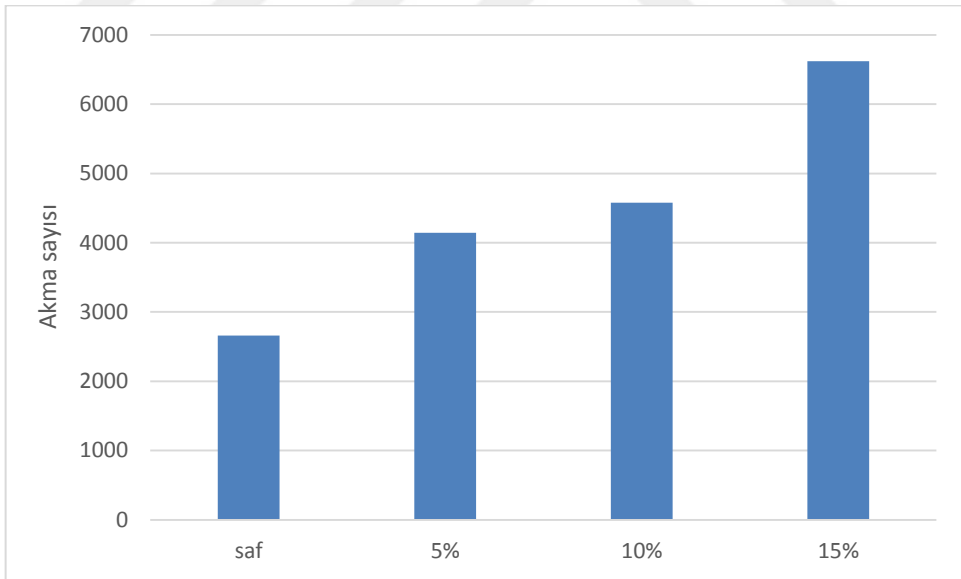
Şekil 4.44’de görüldüğü üzere katkı içeriği arttıkça kalıcı birim şekil değiştirme değerleri düzenli olarak azalmıştır. %5, %10 ve %15 aktif karbon modifiyeli bitümlerle hazırlanan karışımların  $\epsilon_c$  değerleri saf bağlayıcı ile hazırlanan karışımların  $\epsilon_c$  değerinden sırasıyla 1,90 kat, 2,18 kat ve 2,89 kat daha düşük olduğu belirlenmiştir. Bu durum, katkı olarak aktif karbon kullanılmasının kalıcı deformasyona karşı dayanımını önemli oranda arttırdığını göstermektedir.

Çalışmada ayrıca dinamik sünme değerleri Bausano ve Williams tarafından önerilen şekilde belirlenen akma sayısı değerleri yardımıyla değerlendirilmiştir (Bausano ve Williams, 2007). Örnek olarak saf bağlayıcı ile hazırlanan karışımın grafik değeri Şekil 4.45’de görülmektedir. Şekil 4.45’de görüldüğü üzere sünme modülü \* yük tekrar sayısı – yük tekrar sayısı grafiğine 2. derece polinom fonksiyonu ile eğim çizgisi eklenmiş ve elde edilen eğim çizgisinin denklemi ve  $R^2$  değeri belirlenmiştir. Ardından denklemin türevi alınarak sıfıra eşitlenmiş, bulunan x değerinden akma sayısını gösteren yük tekrar sayısı değeri elde edilmiştir.



**Şekil 4.45.** Saf bağlayıcı ile hazırlanan karışımın akma sayısının belirlenmesi

Akma sayısı değerlerinin katkı kullanımı ve katkı içeriği ile değişimi Şekil 4.46’te görülmektedir.



**Şekil 4.46.** Karışımların akma sayıları

Şekil 4.46’da görüldüğü üzere katkı kullanımı ile akma sayısı değerleri önemli ölçüde artmış olup katkı içeriği arttıkça düzenli olarak artmıştır. Bitüm modifikasyonunda %5, %10 ve %15 aktif karbon kullanılması ile bitümlü sıcak karışımların akma sayısı değeri saf bağlayıcı ile hazırlanan karışımların akma sayısı

değerlerinden sırasıyla %55,9; %72,2 ve %149,0 oranlarında yüksek çıkmıştır. Elde edilen sonuçlardan aktif karbon kullanılması ile bitümlü sıcak karışımların kalıcı deformasyon karşı dayanımlarının önemli oranda arttığı tespit edilmiştir.



## 5. SONUÇLAR

Tez çalışmasında şlempe ve cibreden elde edilen aktif karbon 3 farklı oranda (%5, %10 ve %15) bitümlü bağlayıcıya ilave edilerek katkı maddesi olarak kullanımının bitümlü bağlayıcıların reolojik özelliklerine ve bitümlü sıcak karışımların mekanik özelliklerine etkisi belirlenmiştir.

Aktif karbon, melastan alkol üretiminde destilasyon artığı olarak ortaya çıkan potasyum içerikli şlempe ve şarap endüstrisinde ortaya çıkan cibreye emdirilip kurutulduktan sonra pirolize tabi tutularak elde edilen karbonize maddenin içerdiği potasyumun su ile ekstrakte edilerek çözelti ortamına alınarak kazanılmıştır. Bu işlemde geriye kalan katı maddenin asit çözeltisiyle stabilize edilip nötralliğe kadar suyla yıkandıktan sonra kurutularak elde edilen aktif karbonun bazı karakteristik özellikleri, SEM-EDX, XRD, DTA-TGA, partikül boyut dağılımı, elementel analiz, BET yüzey alanı, yoğunluk gibi özellikleri belirlenen şartlarda ortaya konulmuştur (Arslanoğlu, 2016).

Saf bitüm olarak PG 58-16 bitümü kullanılmıştır. Agregası olarak Elazığ Karayolu Bölgesi'nden temin edilen kalker türü agregası kullanılmıştır. Saf bitüme 3 farklı oranda (%5, %10 ve %15) cibre ve şlempeden elde edilen aktif karbon ilave edilerek modifiye bitümler elde edilmiştir. Saf ve modifiye bitümler üzerinde penetrasyon, yumuşama noktası, dönel viskozite, dinamik kayma reometresi (DSR) ve kırılgan eğme reometresi (BBR) deneyleri uygulanmıştır.

Penetrasyon, viskozite ve yumuşama noktası deneyleri sonucunda bitüm modifikasyonunda aktif karbon kullanımı ile bitümlü bağlayıcıların penetrasyon değeri azalırken yumuşama noktası ve viskozite değerlerinin arttığı belirlenmiştir. Bu durum bitüm modifikasyonunda aktif karbon kullanımı ile bağlayıcıların kıvamının arttığını, işlenebilirlik açısından daha fazla sıcaklığa dolayısıyla daha fazla enerjiye ihtiyaç duyulacağını göstermektedir.

DSR deneyleri sonucunda aktif karbon kullanımı ile bitümlü bağlayıcıların tekerlek izi oluşumuna karşı dayanımlarının arttığı tespit edilmiştir. BBR deney sonuçlarından katkı içeriği arttıkça rijitlik artmasına rağmen performans seviyesi düşük sıcaklık değerine herhangi bir etkisinin olmadığı, saf bağlayıcıyla aynı performans seviyesine sahip oldukları tespit edilmiştir. Saf bağlayıcı ve %5 aktif karbon içeren modifiye

bitümlerin performans seviyesinin PG 58-16 olduğu, %10 ve %15 aktif karbon modifiyeli bitümlerin performans seviyesinin PG 64-16 olduğu belirlenmiştir.

Saf bağlayıcı ile hazırlanan karışımın Marshall tasarım yöntemine göre optimum bitüm içeriği %4,9 olarak belirlenmiştir. Bitüm oranının deney sonuçlarına etki etmesini engellemek amacıyla modifiye bitümlerle hazırlanan bütün karışımlar da aynı bitüm içeriğinde (%4,9) hazırlanmış ve sonuçlar Karayolları Teknik Şartname gereksinimleri ile kıyaslanmıştır. Elde edilen sonuçlardan bütün karışımların şartname gereksinimlerini sağladığı belirlenmiştir.

Marshall stabilite ve akma deneyleri sonucunda bitüm modifikasyonunda aktif karbon kullanımı ile stabilite değerleri artarken akma değerlerinin azaldığı belirlenmiştir. Marshall stabilite ve akma deneyleri sonucunda en iyi sonuca bitüm modifikasyonunda %15 aktif karbon kullanılan bitümlü sıcak karışımların sahip olduğu, en düşük sonuca ise saf bağlayıcı ile hazırlanan karışımların sahip olduğu tespit edilmiştir. Marshall oranı değerlerinden aktif karbon kullanımı ile bu değerlerin arttığı dolayısıyla aktif karbon modifikasyonunun kalıcı deformasyona karşı dayanımı olumlu etkilediği belirlenmiştir.

İndirekt çekme dayanımı değerlerinden koşullandırma öncesinde bitüm modifikasyonunda aktif karbon kullanımı ile bu değerlerin arttığı belirlenmiştir. Koşullandırma sonrasında ise modifiye karışımların çekme dayanımı değerlerinin azaldığı tespit edilmiştir. Nem hasarına karşı dayanımın göstergesi olan çekme dayanımı oranı değerlerinden bitüm modifikasyonunda aktif karbon kullanımı ile nem hasarına karşı dayanımın azaldığı tespit edilmiştir.

İndirekt çekme rijitlik modülü değerlerinden bitüm modifikasyonunda aktif karbon kullanımı ile bitümlü sıcak karışım numunelerinin rijitliklerinin önemli oranda arttığı belirlenmiştir. Karışımlar içerisinde en yüksek rijitliğe %15 aktif karbon modifiyeli bitümle hazırlanan karışımın, en düşük rijitliğe ise saf bağlayıcı ile hazırlanan karışımın sahip olduğu tespit edilmiştir.

İndirekt çekme yorulma deneyleri sonucunda bitüm modifikasyonunda aktif karbon kullanımı ile yorulma çatlaklarına karşı dayanımın önemli oranda arttığı belirlenmiştir. %15 aktif karbon kullanılan karışım, %10 aktif karbon kullanılan karışımdan daha gevrek davranış sergilemiştir. Çatlak ilerleme oranı değerlerinden çatlak ilerleyişine karşı dayanımı en yüksek olan karışımın %10 aktif karbon modifiyeli bitüm ile

hazırlanan karışım olduğu, en düşük karışımın ise saf bağlayıcı ile hazırlanan karışım olduğu tespit edilmiştir.

Dinamik sünme dayanımı deneyleri sonucunda DSR ve MQ değerleri ile uyumlu olarak bitüm modifikasyonunda aktif karbon kullanımı ile kalıcı deformasyona karşı dayanımın önemli oranda yükseldiği belirlenmiştir. Kalıcı deformasyona karşı dayanımı en yüksek olan karışımın bitüm modifikasyonunda %15 aktif karbon kullanılan karışımların, en düşük değere ise saf bağlayıcı ile hazırlanan karışımın sahip olduğu tespit edilmiştir.

Bütün deney sonuçları değerlendirildiğinde bitüm modifikasyonunda cibre ve şlempeden elde edilen aktif karbon kullanımı ile bitümlü bağlayıcıların kıvamlarının ve yüksek sıcaklık performanslarının arttığı, düşük sıcaklık performanslarının çok fazla etkilenmedikleri, aktif karbon modifiyeli bitümlerle hazırlanan karışımların Marshall stabilitelerinin, rijitliklerinin, yorulma çatlaklarına ve kalıcı deformasyon oluşumuna karşı dayanımlarının olumlu etkilendiği belirlenmiştir. Bitüm modifikasyonunda aktif karbon kullanımının sadece nem hasarına karşı dayanımı olumsuz etkilediği tespit edilmiştir. Bu olumsuzluğu gidermek amacıyla bitüm modifikasyonunda aktif karbon kullanımı ile birlikte bitümlü sıcak karışımların nem hasarına karşı dayanımı arttıran malzemelerin (filler olarak hidrate kireç kullanımı gibi) birlikte kullanımının fayda sağlayabileceği düşünülmektedir.



## KAYNAKLAR

- [1]. AASHTO T283, 2003. Standard method of test for resistance of compacted hot mix asphalt (HMA) to moisture-induced damage, American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), Washington DC.
- [2]. **Altaş, Ö.Y**, 2002. Bitümlü malzemeler ve karışım şartnamelerinin karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [3]. **Arabani, M. ve Tahami, S.A.**, 2017. Assessment of mechanical properties of rice husk ash modified asphalt mixture, *Construction and Building Materials*, 149, 350-358.
- [4]. **Aragao, F.T.S, Lee J, Kim, Y.R. ve Karki, P**, 2010. Material specific effects of hydrated lime on the properties and performance behaviour of asphalt mixtures and asphaltic pavements, *Construction and Building Materials*, 24(4), 538-544.
- [5]. **Arslanoğlu, H.**, 2016. Şlepme ve cibreden yavaş salınımlı potasyum-struvit gübresi üretimi için bir proses geliştirilmesi, Doktora Tezi. Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [6]. ASMÜD, Türkiye’de asfalt endüstrisi, 2007
- [7]. **Bausano, J. ve Williams, C**, 2007. A new approach to calculating flow number, Unpublished Paper.
- [8]. **Benhood, A., Gharehveran, M.M.**, 2018. Morphology, rheology, and physical properties of polymer-modified asphalt binders, *European Polymer Journal*, 112, 766-791.
- [9]. **Bostancıoğlu, M.**, 2012. Bitkisel atıklardan elde edilen kimyasal ürünler ile bitümlü sıcak karışımların mekanik özelliklerinin geliştirilmesi, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- [10]. **Çeloğlu, M. E., Yılmaz, M., Kök, B.V., Yalçın, E.**, 2016. Effects of various biochars on the high temperature performance of bituminous binder, E&E Congress, 1-3 June 2016, Prague, Czech Republic.

- [11]. **Christensen, D.W, Anderson, D.A**, 1992. Interpretation of dynamic mechanical test data for paving grade asphalt cements, Proc. Assn. Asphalt Paving Technol, 61, 67–116.
- [12]. **Çolak, K.M.**, 2006. Asfalt kaplamalarda sinerjetik fayda konusunun anlaşılmasında Marshall oranı yaklaşımının kullanılması, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- [13]. **Das, A.**, 2015. Analysis of pavement structures, CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton London, New York, USA.
- [14]. **Dinç, E**, 1999. Performans sınıfı asfaltlar, bağlayıcı özellikleri ve deneyleri, T.C.K. 16. Bölge müdürlüğü, Sivas, 45s.
- [15]. **Gao, J., Wang, H., You, Z., Hasan, M.R.M.**, 2018. Research on properties of bio-asphalt binders based on time and frequency sweep test, Construction and Building Materials, 160, 786-793.
- [16]. **Geçkil, T.**, 2008. Siyah karbonun bitümlü sıcak karışımların özelliklerine etkisinin araştırılması, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [17]. **Hınışoğlu, S. ve Ağar, E**, 2004. Use of the waste high density polyethylene as bitumen modifier in asphalt concrete mix, Materials Letters, 58, 267-271.
- [18]. KTS, Karayolları Teknik Şartnamesi, 2013.
- [19]. **Kennedy, T.W, Huber, G.A, Harrigan, E.T, Cominsky, R.J, Hughes, C.S, Quintus, H.V, Moulthrop, J.S.**, 1994. Superior performing asphalt pavements (Superpave): The product of the SHRP asphalt research program, SHRP-A-410, National Research Council, Washington, DC, 170p.
- [20]. **Khodaii, A., Mehrara, A**, 2009. Evaluation of permanent deformation of unmodified and sbs modified asphalt mixtures using dynamic creep test, Construction and Building Materials, 23(7), 2586-2592.
- [21]. **Korayem, A.H., Ziari, H., Hajiloo, M., Moniri, A.**, 2018. Rutting and fatigue performance of asphalt mixtures containing amorphous carbon as filler and binder modifier, Construction and Building Materials, 188, 905-914.
- [22]. **Lei, Y., Wang, H., Fini, E.H., You, Z., Yang, X., Gao, J., Dong, S., Jiang, G.**, 2018. Evaluation of the effect of bio-oil on the high-temperature performance of rubber modified asphalt, Construction and Building Materials, 191, 692-701.

- [23]. **Loh, S, Olek, J**, 1999. Contributions of PG graded asphalt to low temperature cracking resistance of pavement, Joint Transportation Research Program, Final Report FHWA/IN/JHRP-96/22, Perdue University, Indiana, 172p.
- [24]. **McGennis, R.B, Shuler, S, Bahia, H.U**. 1994. Background of superpave asphalt binder test methods, U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration, FHWA-SA-94-069, 104p, Washington, DC.
- [25]. **Öztürk, E.A, Çubuk, M.K**, 2004. Karayolu esnek üstyapı tasarımında yeni bir yöntem: yüksek performanslı asfalt kaplama, Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der, 19 (2), 175-184.
- [26]. **Petersen, J.C, Robertson, R.E, Branthaver, J.F, Harnsberger, P.M, Duvall, J.J, Kim, S.S, Anderson, D.A, Christensen, D.W, Bahia, H.U, Dongre, R, Antle, C.E., Sharma, M.G**, 1994. Binder characterization and evaluation volume 4: Test methods, Strategic Highway Research Program, SHRP A-370, National Research Council Washington, DC, 197p.
- [27]. **Subagio, B.S, Siswosoebrotho, B.I ve Karsaman, R.H.**, 2003. Development of laboratory performance of Indonesian rock asphalt (asbuton) in hot rolled asphalt mix, Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, 4, 436-449.
- [28]. **Tahami, S.A., Arabani, M., Mirhosseini, A.F.**, 2018. Usage of two biomass ashes as filler in hot mix asphalt, Construction and Building Materials, 170, 547-556.
- [29]. TS EN 1426, 2002. Bitümler ve bitümlü bağlayıcılar – İğne batma derinliği tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- [30]. TS EN 1427, 2002. Bitümler ve bitümlü bağlayıcılar - Yumuşama noktası tayini - Halka ve bilye metodu, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- [31]. **Tunç, A**, 2001. Yol malzemeleri ve uygulamaları, Atlas Yayınevi, İstanbul, 840s.
- [32]. TÜİK Motorlu taşıt sayısı istatistikleri, Erişim tarihi: 05.01.2019
- [33]. **Ullidtz P** (1987) Pavement Analysis. Elsevier, Amsterdam
- [34]. **Warren, R.S, McGennis, R.B, Bahia, H.U**, 1994. Superpave asphalt binder test methods an illustrated overview, National Asphalt Training Center Demonstration Project 101, Publication No. FHWA-SA-94-068, Asphalt Institute, Lexington, 164p.

- [35]. **Witczak, M.W, Kaloush, K.E, Pellinen, T, El-Basyouny, M. ve Von Quintus, H**, 2002. Simple performance test for Superpave mix design, The National Cooperative Highway Research Program, NCHRP Rep 465, 465p, Washington, DC.
- [36]. **Yamaç, Ö.E.**, 2015. Stiren-butadien-stiren ve gilsonit'in birlikte kullanımının bitümlü sıcak karışımların mekanik özellikleri üzerindeki etkileri, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [37]. **Yang, X. ve You, Z.**, 2015. High temperature performance evaluation of bio-oil modified asphalt binders using the DSR and MSCR tests, Construction and Building Materials, 76, 380-387.
- [38]. **Yang, X., You, Z., Dai, Q., Mills-Beate, J.**, 2014. Mechanical performance of asphalt mixtures modified by bio-oils derived from waste wood resources, Construction and Building Materials, 51, 424-431.
- [39]. **Yılmaz, B.**, 2016. Bor içerikli organik katkıyla modifiye edilen asfaltın performans özelliklerinin araştırılması, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- [40]. **Yılmaz, M. ve Kök, B.V**, 2008. Stiren-butadien-stiren modifiyeli bitümlü bağlayıcıların Superpave sistemlerine göre yüksek sıcaklık performans seviyesine ve işlenebilirliğinin belirlenmesi, Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi. 23(41), 811-819.
- [41]. **Yılmaz, M, Kök, B.V, Çeloğlu, M.E, Yalçın, E, Erdoğan Yamaç, Ö, Akpolat, M**, 2015. Stiren-butadien-stiren ve Gilsonit'in birlikte kullanımının modifiye bitümlerin depolama stabilitesi üzerindeki etkisinin araştırılması, Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (FÜBAP), Performans Projesi, Proje No: MF.14.22. Elazığ.
- [42]. **Zaniewski, J.P. ve Pumphrey, M.E**, 2004. Evaluation of performance graded asphalt binder equipment and testing protocol, Asphalt Technology Program, Morgantown, West Virginia, 107p.
- [43]. **Zhao, S., Huang, B., Ye, X.P., Shu, X., Jia, X.**, 2014. Utilizing bio-char as a bio-modifier for asphalt cement: A sustainable application of bio-fuel by-product, Fuel, 133, 52-62.

- [44]. **Zoorob, S.E. ve Suparma, L.B**, 2000. Laboratory design and investigation of the properties of continuously graded asphaltic concrete containing recycled plastics aggregate replacement (plastiphalt), *Cement&Concrete Composites*, 22, 233-242.



## ÖZGEÇMİŞ

05.11.1993 yılında Elazığ'da doğdu. İlk tahsilini Dumlupınar ve Mezre İlköğretim Okullarında 2007 yılında tamamladıktan sonra 2011 yılında Elazığ Cumhuriyet Lisesi'nden mezun oldu. Ardından aynı yıl kazandığı Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nü 2015 yılında bitirdi.

2017-2018 Güz Dönemi'nde Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde Ulaştırma Anabilim Dalı Tezli Yüksek Lisans eğitimime başlamıştır.

2018 YKS ile Fırat Üniversitesi İnsani ve Sosyal Bilimler Fakültesi İngiliz Dili Ve Edebiyatı Bölümü'nü kazanmış ancak yüksek lisans tez çalışmasının yoğunluğu nedeniyle kaydını dondurmak zorunda kalmıştır. Yine aynı dönem başladığı Anadolu Üniversitesi'nde ikinci üniversite programı kapsamında Coğrafi Bilgi Sistemleri programına devam etmektedir.

Elif Şeyma Seyrek