

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

**POLİMER KATKILI BİTÜMLÜ BAĞLAYICILARLA  
HAZIRLANAN SICAK KARIŞIMLARIN KIRILMA MEKANİĞİ  
VE YORULMA BAKIMINDAN İNCELENMESİ**

**DOKTORA TEZİ**

**Yük. Müh. Mesude YILMAZ**

**Anabilim Dalı: İnşaat Mühendisliği**

**Danışman: Yrd. Doç. Dr. Taner ALATAŞ**

**NİSAN-2013**

T.C  
FIRAT ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

POLİMER KATKILI BİTÜMLÜ BAĞLAYICILARLA HAZIRLANAN SICAK  
KARIŞIMLARIN KIRILMA MEKANİĞİ VE YORULMA BAKIMINDAN  
İNCELENMESİ

DOKTORA TEZİ

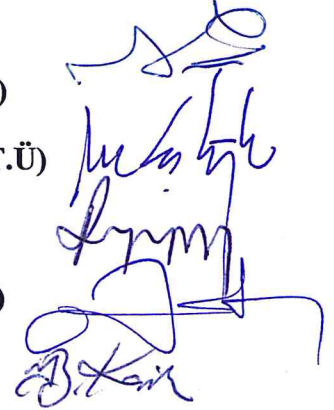
Yük. Müh. Mesude YILMAZ

(06115201)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 26 Mart 2013

Tezin Savunulduğu Tarih : 12 Nisan 2013

Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Taner ALATAŞ (F.Ü)  
Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Mehmet ÇAKIROĞLU (T.Ü)  
Prof. Dr. Ragıp İNCE (F.Ü.)  
Doç. Dr. Ömer KELEŞOĞLU (F.Ü)  
Doç. Dr. Baha Vural KÖK (F.Ü)



NİSAN-2013

## ÖNSÖZ

Doktora tezimin çalışma konusunu öneren, planlanması ve yürütülmesinde benden destek ve ilgilerini esirgemeyen, bilgi ve önerilerinden yararlandığım danışman hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Taner ALATAŞ'a saygı ve şükranlarımı sunarım.

Lisansüstü eğitimim süresince tecrübe ve önerilerinden yararlandığım Ulaştırma Anabilim Dalı Başkanı sevgili babam Prof. Dr. Necati KULOĞLU'na, tezin her aşamasında yardımda bulunan değerli hocam Sayın Doç. Dr. Baha Vural KÖK'e, kırılma mekaniği konusunda bilgisinden faydalandığım Sayın Prof. Dr. Ragıp İNCE'ye, çalışma süresince görüş ve önerileri ile çalışmaya katkıda bulunan ve her türlü maddi - manevi desteğini benden esirgemeyen değerli eşim Yrd. Doç. Dr. Mehmet YILMAZ'a teşekkürlerimi sunarım.

Tezime maddi destek sağlayan Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon birimi (FÜBAP)'ne teşekkürü bir borç bilirim.

Mesude YILMAZ

Elazığ - 2013

## İÇİNDEKİLER

|  | <u>Sayfa No</u> |
|--|-----------------|
| <b>ÖNSÖZ</b> .....   | <b>I</b>        |
| <b>İÇİNDEKİLER</b> .....   | <b>II</b>       |
| <b>ÖZET</b> .....  | <b>V</b>        |
| <b>SUMMARY</b> .....   | <b>VI</b>       |
| <b>ŞEKİLLER LİSTESİ</b> .....  | <b>VII</b>      |
| <b>TABLolar LİSTESİ</b> .....  | <b>XI</b>       |
| <b>SEMBOLLER LİSTESİ</b> .....   | <b>XIV</b>      |
| <b>KISALTMALAR</b> .....   | <b>XVI</b>      |
| <br>   |                 |
| <b>1. GİRİŞ</b> .....  | <b>1</b>        |
| 1.1. Çalışmanın Önemi ve Konusu .....  | 1               |
| 1.2. Çalışmanın Amacı ve İzlenen Yol .....                                   | 4               |
| <br>   |                 |
| <b>2. BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIMLAR</b> .....                                     | <b>6</b>        |
| 2.1. Bitümlü Sıcak Karışımlarda Aranılan Özellikler .....                    | 6               |
| 2.1.1. Bitümlü Sıcak Karışımların Stabilitesi .....                          | 7               |
| 2.1.2. Bitümlü Sıcak Karışımların Rijitliği .....                            | 8               |
| 2.1.3. Bitümlü Sıcak Karışımların Dayanıklılığı (Durabilitesi) .....         | 8               |
| 2.1.4. Bitümlü Sıcak Karışımların Yorulma Mukavemeti .....                   | 9               |
| 2.1.5. Bitümlü Sıcak Karışımların Esnekliği (Fleksibilitesi) .....           | 12              |
| 2.1.6. Bitümlü Sıcak Karışımların Geçirgenliği (Permeabilitesi) .....        | 12              |
| 2.1.7. Bitümlü Sıcak Karışımların Kayma Direnci .....                        | 13              |
| 2.1.8. Bitümlü Sıcak Karışımların İşlenebilirliği .....                      | 13              |
| 2.2. Bitümlü Sıcak Karışımlarda Kullanılan Malzemeler .....                  | 16              |
| 2.2.1. Bitümlü Sıcak Karışımlarda Kullanılan Agregalar .....                 | 16              |
| 2.2.1.1. Agregalarda Köken Sınıflandırılması .....                           | 16              |
| 2.2.1.2. Agregalarda Boyut Sınıflandırması .....                             | 16              |
| 2.2.1.3. Agregalarda Gradasyon Sınıflandırması .....                         | 18              |
| 2.2.1.4. Agregaların Biçim, Yüzey Dokusu ve Porozite Sınıflandırılması ..... | 19              |
| 2.2.2. Bitümlü Sıcak Karışımlarda Kullanılan Bitümlü Bağlayıcılar .....      | 20              |
| 2.2.2.1. Doğal Asfaltlar .....   | 22              |
| 2.2.2.2. Rafineri Asfaltları .....   | 22              |
| 2.2.2.3. Sıvı Petrol Asfaltları .....  | 23              |
| 2.2.2.4. Bitüm Emülsiyonları .....   | 23              |
| 2.3. Bitümlü Sıcak Karışımlarda Oluşan Bozulmalar .....                      | 25              |
| 2.3.1. Tekerlek İzi Oluşumu .....  | 27              |
| 2.3.2. Yorulma Çatlakları (Timsah Sırtı Çatlaklar) .....                     | 30              |
| 2.3.3. Düşük Sıcaklık Çatlakları .....                                       | 31              |
| 2.3.4. Sudan Kaynaklanan Bozulmalar .....                                    | 33              |
| <br>   |                 |
| <b>3. BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIMLARDA KATKI KULLANIMI</b> .....                   | <b>35</b>       |
| 3.1. Katkı Maddelerinin Bitümlü Karışımların Özelliklerine Etkileri .....    | 35              |
| 3.2. Katkı Kullanımının Amacı .....  | 37              |
| 3.3. Bitüm Katkı Maddeleri ve Katkılı Bitümlerde Aranılan Özellikler .....   | 38              |

|           |  |            |
|-----------|--|------------|
| 3.4.      | Bitüm Katkı Maddelerinin Sınıflandırılması .....   | 39         |
| 3.5.      | Bitümlü Sıcak Karışımlarda SBS Kullanımı .....   | 41         |
| 3.6.      | Bitümlü Sıcak Karışımlarda EVA Kullanımı .....   | 49         |
| 3.7.      | Bitümlü Sıcak Karışımlarda MD 243 Kullanımı .....  | 52         |
| <b>4.</b> | <b>ÇALIŞMADA KULLANILAN DENEY YÖNTEMLERİ .....</b>   | <b>55</b>  |
| 4.1.      | Bağlayıcı Deneyleri .....  | 55         |
| 4.1.1.    | Geleneksel Bağlayıcı Deneyleri .....   | 55         |
| 4.1.2.    | Superpave Bağlayıcı Deneyleri .....  | 57         |
| 4.1.2.1.  | Dönel İnce Film Halinde Isıtma Deneyi (RTFOT) .....  | 57         |
| 4.1.2.2.  | Basıncılı Yaşlandırma Aleti (PAV) Deneyi .....   | 58         |
| 4.1.2.3.  | Dönel Viskozimetre (RV) Deneyi .....   | 59         |
| 4.1.2.4.  | Dinamik Kesme Reometresi (DSR) Deneyi .....  | 60         |
| 4.1.2.5.  | Kiriş Eğme Reometresi (BBR) Deneyi .....   | 63         |
| 4.2.      | Superpave Yöntemine Göre Bitümlü Sıcak Karışım Tasarımı .....  | 65         |
| 4.2.1.    | Tasarım Agrega Gradasyonu Seçimi .....   | 65         |
| 4.2.2.    | Superpave Hacimsel Karışım Tasarımı .....  | 68         |
| 4.2.3.    | Deneme Karışımlarının Değerlendirilmesi .....  | 74         |
| 4.2.4.    | Bitümlü Sıcak Karışımların Tasarım Asfalt Bağlayıcı İçeriklerinin<br>Tespit Edilmesi .....                   | 77         |
| 4.2.5.    | Marshall Stabilite ve Akma Deneyi .....  | 78         |
| 4.2.6.    | Nem Hasarına Karşı Dayanım Deneyi (AASHTO T 283) .....   | 80         |
| 4.2.7.    | Kırılma Tokluğu Deneyi .....   | 82         |
| 4.2.8.    | İndirekt Çekme Rijitlik Modülü Deneyi .....  | 84         |
| 4.2.9.    | İndirekt Çekme Yorulma Deneyi .....  | 86         |
| 4.2.10.   | Kırılma Mekanizması Yaklaşımlarıyla BSK'ların Çatlak İlerleyişine Karşı<br>Dayanımlarının Belirlenmesi ..... | 90         |
| 4.2.10.1. | Yarım Daire Eğilme Deneyi (EN 12697-44) .....  | 96         |
| 4.2.10.2. | Üç Nokta Eğilme Kırılma Deneyi .....   | 100        |
| <b>5.</b> | <b>DENEYSEL ÇALIŞMALAR .....</b>   | <b>104</b> |
| 5.1.      | Superpave Sistemine Göre Malatya İçin Uygun Bağlayıcının Seçilmesi .....                                     | 104        |
| 5.2.      | Bağlayıcı Deney Sonuçları .....  | 108        |
| 5.3.      | Agregaların Fiziksel Özellikleri .....   | 120        |
| 5.4.      | Superpave Yöntemine Göre Karışımların Hacimsel Tasarımı .....  | 121        |
| 5.4.1.    | B 160/220 Bitümü İle Hazırlanan Karışımlar İçin Tasarım Bağlayıcı<br>İçeriğinin Tespit Edilmesi .....        | 134        |
| 5.4.2.    | Modifiye Bağlayıcılar ile Hazırlanan Karışımlar İçin Tasarım<br>Bağlayıcı İçeriğinin Tespit Edilmesi .....   | 140        |
| 5.5.      | Marshall Stabilite ve Akma Deney Sonuçları .....   | 145        |
| 5.6.      | Çekme Dayanımı Oranı Deney Sonuçları .....   | 152        |
| 5.7.      | Tokluk İndeksi Deney Sonuçları .....   | 158        |
| 5.8.      | İndirekt Çekme Rijitlik Modülü Deney Sonuçları .....   | 164        |
| 5.9.      | İndirekt Çekme Yorulma Deney Sonuçları .....   | 167        |
| 5.10.     | Karışımların Çatlak İlerleyişine Karşı Dayanımlarının Belirlenmesi .....                                     | 183        |
| 5.10.1.   | Yarım Daire Şeklinde Numuneler Üzerinde Uygulanan Eğilme Deneyi .....  | 183        |
| 5.10.2.   | Üç Nokta Kiriş Eğilme Deneyi .....   | 194        |

|   |            |
|---|------------|
| 5.10.3. LEKM Deneylerinin Karşılaştırılması ..... | 207        |
| <b>6. SONUÇLAR .....</b>                          | <b>209</b> |
| <b>KAYNAKLAR .....</b>                            | <b>211</b> |
| <b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>                             | <b>222</b> |

## ÖZET

Bu tez çalışmasında; iki farklı elastomer sınıfı stiren-butadien-stirenin (SBS D 1101 ve SBS MD 243) ve plastomer sınıfı etilen-vinil-asetatın (EVA) bitümlü bağlayıcı ve karışımların mühendislik özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. B 160/220 saf bitümüne farklı oranlarda SBS D 1101, SBS MD 243 ve EVA ilave edilerek hazırlanan modifiye bağlayıcılar, Superpave bağlayıcı deneylerine tabi tutulmuş ve bağlayıcıların performans seviyeleri belirlenmiştir. Aynı miktardaki katkı oranlarını değerlendirmek amacıyla bütün katkılardan %4 oranında kullanılmıştır.

Saf ve modifiye bitümler ile tasarım bitüm içeriklerinde hazırlanan karışımlar üzerinde Marshall stabilite ve akma, kalıcı Marshall stabilitesi, nem hasarına karşı dayanım, tokluk indeksi, indirekt çekme rijitlik modülü (ITSM), indirekt çekme yorulma deneyleri uygulanmıştır. Ayrıca karışımların çatlak ilerleyişine karşı dayanımları lineer elastik kırılma mekaniği (LEKM) prensiplerine uygun olarak yarım daire eğilme ve üç nokta kırış eğilme yöntemleriyle incelenmiştir. Karışımlar üzerinde uygulanan deneylerden en yüksek stabilite değerine SBS D 1101, en yüksek kalıcı Marshall stabilitesi değerine ise SBS MD 243 ve EVA katkılı bitümlerle hazırlanan karışımların sahip olduğu tespit edilmiştir. ITSM deneyleri sonucunda, en yüksek değere EVA modifiyeli bağlayıcılarla hazırlanan karışımların, en düşük değere ise B160/220 ile hazırlanan karışımların sahip olduğu belirlenmiştir. Katkı kullanımıyla önemli oranda artan yorulma ömürleri karşılaştırıldığında en yüksek değere EVA modifiyeli bitümle hazırlanan karışımın en düşük değere ise B 160/220 ile hazırlanan karışımın sahip olduğu tespit edilmiştir. LEKM prensiplerine uygun olarak yapılan deneylerden çatlak ilerlemesine karşı dayanımı en yüksek olan karışımın deney türü ve sıcaklığa bağlı olarak B 160/220, SBS D 1101 ve SBS MD 243 modifiyeli bitümle hazırlanan karışımlar arasında değiştiği belirlenmiştir. Çatlak ilerleyişine karşı dayanımı en düşük olan karışımın ise bütün sıcaklıklarda ve her iki deney yönteminde de EVA modifiyeli bitüm içeren bağlayıcılarla olduğu tespit edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Stiren-butadien-stiren, Etilen-vinil-asetat, Bitüm, Bitümlü sıcak karışım, Yorulma, Çatlak ilerleyişine karşı dayanım.

## SUMMARY

### **Fracture Mechanics and Fatigue Investigation of Hot Mixtures Prepared with Polymer Modified Bituminous Binders**

In this research study, the effects of two different types of styrene-butadiene- styrene (SBS D 1101 and SBS MD 243) and plastomer type Ethylene-vinyl-acetate (EVA) on engineering properties of both bituminous binders and their mixtures were examined. Modified binders obtained by addition of SBS D 1101, SBS MD 243 and EVA to pure bitumen B 160/220 at different proportions were subjected to Superpave binder experiments and the performance grades of the modified binders were determined. In order to compare properties, the amount of addition was kept constant at 4%.

Marshall stability and flow, retained Marshall stability, resistance to moisture-induced damage, toughness index, indirect tensile stiffness modulus (ITSM) and indirect tensile fatigue tests were performed on pure and modified mixtures as well as on design bitumens. Meanwhile, crack propagation resistance of mixtures was examined through semi-circular bending and three point beam bending methods according to the principles of elastic fracture mechanics (LEFM). Experiments performed on the mixtures demonstrated that the highest stability value was obtained for sample SBS-D 1101 and the highest Marshall stability value was obtained for mixtures with SBS-MD 243 and EVA added bitumens. The results of ITSM experiments showed that the highest value was obtained for mixtures with EVA modified binders, while the lowest value was achieved mixtures with B160/220. When the fatigue life of the samples which increased significantly with the use of additives is compared, the highest fatigue life was achieved for mixture with EVA modified bitumens, while the lowest value was obtained for mixture with B 160/220. In experiments performed according to principles of LEFM, the mixture with highest fracture resistance was mixture with B 160/220, SBS-D 1101 or SBS-MD 243 modified bitumen , depending on the type of the experiment and temperature. However, the mixture with lowest fracture resistance against crack propagation was found to be one with EVA modified bitumen for both experimental methods and at all temperatures.

**Key Words:** Styrene-butadiene-styrene, Ethylene-vinyl-acetate, Bitumen, Hot mix asphalt, Fatigue, Resistance to crack propagation.



## ŞEKİLLER LİSTESİ

|  | <u>Sayfa No</u> |
|--|-----------------|
| Şekil 2.1. Karışımların sıcaklık, gerilme ve yorulma ömrü ilişkisi .....                         | 12              |
| Şekil 2.2. Agregalarda mikro ve makro pürüzlülük .....   | 13              |
| Şekil 2.3. Agrega gradasyon tipleri (a) ve görsel dağılımı (b) .....                             | 19              |
| Şekil 2.4. Bitümlü malzemelerin sınıflandırılması .....  | 21              |
| Şekil 2.5. Tek, tandem ve tridem dingile sahip ağır taşıtlara örnekler .....                     | 26              |
| Şekil 2.6. Üstyapı performans eğrisi ve rehabilitasyon gösterimi .....                           | 27              |
| Şekil 2.7. Yapısal tekerlek izi .....  | 28              |
| Şekil 2.8. Akma tekerlek izi .....   | 28              |
| Şekil 2.9. Hafif (a) ve yüksek (b) şiddette tekerlek izi oluşumu .....                           | 29              |
| Şekil 2.10. Aşınma ve oturma tekerlek izi .....  | 29              |
| Şekil 2.11. Hafif (a), orta (b) ve yüksek (c) şiddette yorulma çatlakları .....                  | 31              |
| Şekil 2.12. Kaplama gerilme durumu ve düşük sıcaklık çatlakları .....                            | 32              |
| Şekil 2.13. Düşük sıcaklık çatlağının büyümesi .....   | 32              |
| Şekil 2.14. Hafif (a), orta (b) ve yüksek (c) şiddette düşük ısı çatlakları .....                | 33              |
| Şekil 3.1. Bitümün statik yükler altındaki visko-elastik davranışı .....                         | 36              |
| Şekil 3.2. Bitümün dinamik yükler altındaki visko-elastik davranışı .....                        | 36              |
| Şekil 3.3. Polimerlerin sınıflandırılması .....  | 40              |
| Şekil 3.4. SBS türü polimerlerin yapısı .....  | 42              |
| Şekil 3.5. Bitümle karışım sıcaklığında ve düşük sıcaklıklarda SBS'nin yapısı .....              | 45              |
| Şekil 3.6. SBS modifikasyonunda kullanılan ekipman .....   | 46              |
| Şekil 3.7. SBS'nin kimyasal yapısı .....   | 47              |
| Şekil 3.8. SBS/Bitüm etkileşimi .....  | 48              |
| Şekil 3.9. Etilen vinil asetatın kimyasal yapısı .....   | 50              |
| Şekil 3.10. SBS MD 243 polimerinin kimyasal yapısı .....   | 53              |
| Şekil 4.1. Penetrasyon deney aleti .....   | 55              |
| Şekil 4.2. Yumuşama noktası deneyi .....   | 56              |
| Şekil 4.3. Dönel ince film halinde ısıtma deney aleti .....                                      | 57              |
| Şekil 4.4. PAV deney aleti .....   | 59              |
| Şekil 4.5. Brookfield viskozimetresi ve sıcaklık sistemi .....                                   | 60              |
| Şekil 4.6. Bohlin DSR II dinamik kesme reometresi .....  | 60              |
| Şekil 4.7. Numunenin silikon kalıba doldurulması (a) ve üst plağa yerleştirilmesi ...            | 61              |
| Şekil 4.8. DSR deneyinde numunelere uygulanan deformasyon yönleri .....                          | 61              |
| Şekil 4.9. Asfalt çimentosunun viskoelastik özelliği .....                                       | 62              |
| Şekil 4.10. Viskoelastik malzemelerin gerilme-deformasyon ilişkisi .....                         | 63              |
| Şekil 4.11. Kiriş eğme reometresi (BBR) deney aleti .....  | 64              |
| Şekil 4.12. BBR deneyi için numune hazırlanması ve deneyin yapılması .....                       | 64              |
| Şekil 4.13. Sünme oranının belirlenmesi .....  | 65              |
| Şekil 4.14. 19 mm maksimum boyut için maksimum yoğunluk gradasyonu .....                         | 66              |
| Şekil 4.15. 19 mm maksimum boyut için Superpave gradasyon limitleri .....                        | 67              |
| Şekil 4.16. Marshall stabilite ve akma aleti .....   | 79              |
| Şekil 4.17. Piknometre ve vakum cihazı, numunelerin koşullandırma işlemi için hazırlanması ..... | 81              |
| Şekil 4.18. Çekme dayanımı deney düzeneği .....  | 82              |

|  |     |
|--|-----|
| Şekil 4.19. Temsili gerilme – şekil değiştirme ilişkisi .....  | 83  |
| Şekil 4.20. ITSM deney düzeneği .....  | 85  |
| Şekil 4.21. Yorulma deney düzeneği .....   | 89  |
| Şekil 4.22. Temsili deformasyon - yük tekerrür sayısı ilişkisi .....   | 89  |
| Şekil 4.23. Kırılma modları .....  | 92  |
| Şekil 4.24. BSK'lara uygulanan lineer elastik kırılma mekaniği deneyleri .....   | 93  |
| Şekil 4.25. Kırılma deneylerinde en çok kullanılan deney geometrileri (a) tek çentikli<br>kiriş eğilme deneyi (b) yarım daire eğilme deneyi (c) disk şeklinde<br>numune çekme deneyi .....   | 95  |
| Şekil 4.26. SCB deneyinde asfalt karışımların elde edilen başlıca yük-deformasyon<br>diyagram türleri. (a) -10°C veya 1°C sıcaklıktaki elastik kırılma (b) 15°C<br>sıcaklıktaki plastik göçme (uzama sertleşmesi yok) (c) 25°C veya daha<br>yüksek sıcaklıkta oluşan uzama sertleşmesi ..... | 95  |
| Şekil 4.27. $Y_1$ değerinin belirlenmesi .....   | 96  |
| Şekil 4.28. Yarım daire eğilme deney düzeneği .....  | 97  |
| Şekil 4.29. Numuneye çentik açılması .....   | 98  |
| Şekil 4.30. Merdaneli sıkıştırıcı .....  | 100 |
| Şekil 4.31. Üç nokta eğilme deney numune örnekleri .....   | 101 |
| Şekil 4.32. Üç nokta eğilme deney düzeneği .....   | 101 |
| Şekil 5.1. Malatya için en düşük ve en yüksek hava sıcaklıklarının dağılımı .....  | 106 |
| Şekil 5.2. Malatya için bağlayıcı sınıfı seçimi .....  | 107 |
| Şekil 5.3. Modifiye bitüm mikseri ve karıştırma başlığı .....  | 109 |
| Şekil 5.4. Penetrasyon değerlerinin katkı türü ve içeriği ile değişimi .....   | 110 |
| Şekil 5.5. Yumuşama noktası değerlerinin katkı türü ve içeriği ile değişimi .....  | 111 |
| Şekil 5.6. Penetrasyon indeksi değerlerinin katkı türü ve içeriği ile değişimi .....   | 111 |
| Şekil 5.7. Bağlayıcıların 135°C sıcaklıktaki viskozite değerleri .....   | 113 |
| Şekil 5.8. Bağlayıcıların 165°C sıcaklıktaki viskozite değerleri .....   | 113 |
| Şekil 5.9. Bağlayıcıların 135°C sıcaklıktaki modifikasyon indisleri .....  | 114 |
| Şekil 5.10. Bağlayıcıların 165°C sıcaklıktaki modifikasyon indisleri .....   | 114 |
| Şekil 5.11. Bağlayıcıların agregayla karıştırma sıcaklıkları .....   | 115 |
| Şekil 5.12. Karışımların sıkıştırma sıcaklıkları .....   | 115 |
| Şekil 5.13. Karışım-1 agrega gradasyon eğrisi .....  | 122 |
| Şekil 5.14. Karışım-2 agrega gradasyon eğrisi .....  | 122 |
| Şekil 5.15. Karışım-3 agrega gradasyon eğrisi .....  | 123 |
| Şekil 5.16. Cooper yoğurmalı sıkıştırıcı .....   | 126 |
| Şekil 5.17. Karışım-1 numunelerinin yoğunluk eğrileri ve ortalaması .....  | 129 |
| Şekil 5.18. Karışım-2 numunelerinin yoğunluk eğrileri ve ortalaması .....  | 130 |
| Şekil 5.19. Karışım-3 numunelerinin yoğunluk eğrileri ve ortalaması .....  | 131 |
| Şekil 5.20. Karışım numunelerinin ortalama yoğunluk eğrileri .....   | 137 |
| Şekil 5.21. Karışımların hacimsel ve yoğunluk özelliklerinin asfalt içeriği ile<br>değişimi .....  | 138 |
| Şekil 5.22. Karışım numunelerinin Nmaks.'da %4,88 bitüm içeriğindeki yoğunluk<br>eğrileri .....  | 140 |
| Şekil 5.23. Karışımların tasarım bitüm içerikleri .....  | 141 |
| Şekil 5.24. Karışımların hava boşluğu ( $V_a$ ) oranları .....   | 142 |
| Şekil 5.25. Karışımların agregalar arası boşluk oranı (VMA) değerleri .....  | 142 |
| Şekil 5.26. Karışımların bitümlle dolu boşluk oranı (VFA) değerleri .....  | 143 |

|   |     |
|---|-----|
| Şekil 5.27. Karışımların filler oranı ( $D_p$ ) değerleri .....   | 143 |
| Şekil 5.28. Karışımların %Gmm@Nini değerleri .....  | 144 |
| Şekil 5.29. Karışımların %Gmm@Nmaks değerleri .....   | 144 |
| Şekil 5.30. Karışımlarının katkı türüyle stabilite değerlerinin değişimi .....  | 148 |
| Şekil 5.31. Karışımlarının katkı türüyle akma değerlerinin değişimi .....   | 149 |
| Şekil 5.32. Karışımlarının Marshall oranı değerlerinin katkı kullanımı ile değişimi ...                               | 150 |
| Şekil 5.33. Karışımlarının RMS değerlerinin katkı kullanımı ile değişimi .....  | 151 |
| Şekil 5.34. Karışımların çekme dayanımı değerleri .....   | 156 |
| Şekil 5.35. Karışımlarının çekme dayanımı oranlarının katkı kullanımı ile değişimi ..                                 | 157 |
| Şekil 5.36. Tokluk indeksi deney düzeneği .....   | 158 |
| Şekil 5.37. B 160/220 bitümü ile hazırlanan karışımların çekme dayanımı - şekil<br>değiştirme ilişkisi .....          | 159 |
| Şekil 5.38. B 160/220 bitümü ile hazırlanan karışımların normalize edilmiş TS –<br>şekil değiştirme ilişkisi .....    | 159 |
| Şekil 5.39. MB <sub>SBS-D</sub> ile hazırlanan karışımların çekme dayanımı - şekil değiştirme<br>ilişkisi .....       | 160 |
| Şekil 5.40. MB <sub>SBS-D</sub> ile hazırlanan karışımların normalize edilmiş TS - şekil<br>değiştirme ilişkisi ..... | 160 |
| Şekil 5.41. MB <sub>SBS-M</sub> ile hazırlanan karışımların çekme dayanımı - şekil değiştirme<br>ilişkisi .....       | 160 |
| Şekil 5.42. MB <sub>SBS-M</sub> ile hazırlanan karışımların normalize edilmiş TS - şekil<br>değiştirme ilişkisi ..... | 161 |
| Şekil 5.43. MB <sub>EVA</sub> ile hazırlanan karışımların çekme dayanımı - şekil değiştirme<br>İlişkisi .....         | 161 |
| Şekil 5.44. MB <sub>EVA</sub> ile hazırlanan karışımların normalize edilmiş TS - şekil<br>değiştirme ilişkisi .....   | 161 |
| Şekil 5.45. Her karışımın normalize edilmiş TS - şekil değiştirme örneği .....  | 162 |
| Şekil 5.46. Maksimum yükteki $\epsilon$ değerlerinin kullanılan bağlayıcı türü ile değişimi ...                       | 163 |
| Şekil 5.47. Tokluk indeksi değerlerinin kullanılan bağlayıcı türü ile değişimi .....                                  | 164 |
| Şekil 5.48. ITSM değerlerinin katkı türü ile değişimi .....   | 165 |
| Şekil 5.49. ITSM değerlerinin sıcaklık ile değişimi .....   | 165 |
| Şekil 5.50. Yorulma deneyi sonrasında numunelerin görünüşü .....  | 168 |
| Şekil 5.51. Karışımların 300 kPa gerilme seviyesinde deformasyon-yük tekrar sayısı<br>ilişkisi .....                  | 172 |
| Şekil 5.52. Karışımların 350 kPa gerilme seviyesinde deformasyon-yük tekrar sayısı<br>ilişkisi .....                  | 172 |
| Şekil 5.53. Karışımların 400 kPa gerilme seviyesinde deformasyon-yük tekrar sayısı<br>ilişkisi .....                  | 173 |
| Şekil 5.54. Çatlak başlangıcı yük tekrar sayısı ( $N_i$ ) – katkı türü ilişkisi .....                                 | 174 |
| Şekil 5.55. Yorulma ömrü ( $N_f$ ) - katkı türü ilişkisi .....  | 175 |
| Şekil 5.56. Çatlak ilerlemesi yük tekrar sayısı ( $N_p$ ) - katkı türü ilişkisi .....                                 | 176 |
| Şekil 5.57. Maksimum yük tekrar sayısı - katkı türü ilişkisi .....  | 176 |
| Şekil 5.58. $N_i$ değerindeki deformasyon miktarı - katkı türü ilişkisi .....   | 177 |
| Şekil 5.59. $N_f$ değerindeki deformasyon miktarı - katkı türü ilişkisi .....   | 178 |
| Şekil 5.60. $N_{mak}$ değerindeki deformasyon miktarı - katkı türü ilişkisi .....                                     | 179 |
| Şekil 5.61. $N_i - N_f$ arası çatlak ilerleme oranı - katkı türü ilişkisi .....                                       | 180 |
| Şekil 5.62. $N_f - N_{mak}$ arası çatlak ilerleme oranı - katkı türü ilişkisi .....                                   | 181 |

|   |     |
|---|-----|
| Şekil 5.63. Karışımların yorulma ömür diyagramları .....  | 182 |
| Şekil 5.64. Numunelere çentik açılması ve deney numuneleri .....                                      | 184 |
| Şekil 5.65. Yarım daire eğilme deney düzeneği .....   | 184 |
| Şekil 5.66. Hızı ayarlanabilir marshall cihazının dijital göstergesi .....                            | 185 |
| Şekil 5.67. 0°C sıcaklıkta numunelerin ortalama yük-deformasyon eğrileri .....                        | 186 |
| Şekil 5.68. -10°C sıcaklıkta numunelerin ortalama yük-deformasyon eğrileri .....                      | 186 |
| Şekil 5.69. -20°C sıcaklıkta numunelerin ortalama yük-deformasyon eğrileri .....                      | 190 |
| Şekil 5.70. Kırılma tokluğu ( $K_{IC}$ ) değerlerinin sıcaklıkla ilişkisi .....                       | 190 |
| Şekil 5.71. Kırılma tokluğu ( $K_{IC}$ ) değerlerinin katkı türü ile ilişkisi .....                   | 191 |
| Şekil 5.72. Maksimum şekil değiştirme ( $\epsilon_{mak}$ ) değerlerinin sıcaklıkla ilişkisi .....     | 192 |
| Şekil 5.73. Maksimum şekil değiştirme ( $\epsilon_{mak}$ ) değerlerinin katkı türü ile ilişkisi ..... | 193 |
| Şekil 5.74. Merdaneli sıkıştırıcı ile numune hazırlanması .....                                       | 196 |
| Şekil 5.75. Üç nokta kırış eğilme deney düzeneği ve deneye tabi tutulmuş numuneler                    | 197 |
| Şekil 5.76. 0°C sıcaklıkta numunelerden elde edilen örnek yük – deformasyon<br>eğrileri .....         | 198 |
| Şekil 5.77. -10°C sıcaklıkta numunelerden elde edilen örnek yük – deformasyon<br>eğrileri .....       | 198 |
| Şekil 5.78. -20°C sıcaklıkta numunelerden elde edilen örnek yük – deformasyon<br>eğrileri .....       | 202 |
| Şekil 5.79. Maksimum yük ( $P_{mak}$ ) değerlerinin sıcaklıkla ilişkisi .....                         | 202 |
| Şekil 5.80. Maksimum yük ( $P_{mak}$ ) değerlerinin katkı türü ile ilişkisi .....                     | 203 |
| Şekil 5.81. Maksimum yükteki deformasyon ( $\delta_{mak}$ ) değerlerinin sıcaklıkla ilişkisi ....     | 204 |
| Şekil 5.82. Maksimum yükteki deformasyon ( $\delta_{mak}$ ) değerlerinin katkı türü ile ilişkisi      | 205 |
| Şekil 5.83. Kırılma tokluğu ( $K_{IC}$ ) değerlerinin sıcaklıkla ilişkisi .....                       | 205 |
| Şekil 5.84. Kırılma tokluğu ( $K_{IC}$ ) değerlerinin katkı türü ile ilişkisi .....                   | 206 |
| Şekil 5.85. 0°C sıcaklıkta yarım daire ve kırış numuneler arasındaki ilişki .....                     | 207 |
| Şekil 5.86. Karışımların $K_{IC}$ değerlerinin farklı sıcaklıklardaki $R^2$ değerleri .....           | 208 |

## TABLolar LİSTESİ

|   | <u>Sayfa No</u> |
|---|-----------------|
| <b>Tablo 2.1.</b> Bitümlü sıcak karışımların temel özelliklerine etki eden parametreler ...               | 15              |
| <b>Tablo 2.2.</b> Kaba agregalarda aranan özellikler .....  | 17              |
| <b>Tablo 2.3.</b> İnce agregalarda aranan özellikler .....  | 17              |
| <b>Tablo 2.4.</b> Türkiye’de üretilen bitümler ve kullanıldıkları bölgeler .....                          | 23              |
| <b>Tablo 2.5.</b> Bitüm emülsiyonlarının kullanım yerleri .....   | 24              |
| <b>Tablo 2.6.</b> Bitümlerin kullanım sıcaklıkları .....  | 24              |
| <b>Tablo 2.6.</b> Bitümlerin kullanım sıcaklıkları (Devamı) .....   | 25              |
| <b>Tablo 3.1.</b> Bitüm katkı maddelerinin genel sınıflandırılması .....                                  | 39              |
| <b>Tablo 3.2.</b> KRATON D 1101 ve D 1192 SBS türlerinin özellikleri .....                                | 43              |
| <b>Tablo 3.3.</b> Evatane®2805’in özellikleri .....   | 51              |
| <b>Tablo 4.1.</b> Bağlayıcı sınıfına bağlı olarak PAV deney sıcaklıkları .....                            | 58              |
| <b>Tablo 4.2.</b> DSR deneyinde kullanılan bağlayıcı türlerine göre şartname limitleri .....              | 63              |
| <b>Tablo 4.3.</b> Superpave karışım gradasyonları .....   | 67              |
| <b>Tablo 4.4.</b> Superpave karışım gradasyon limitleri .....   | 67              |
| <b>Tablo 4.5.</b> Taşıt sayısına göre sıkıştırma parametreleri .....                                      | 71              |
| <b>Tablo 4.6.</b> Superpave VMA gereksinimleri .....  | 73              |
| <b>Tablo 4.7.</b> Superpave VFA gereksinimleri .....  | 74              |
| <b>Tablo 4.8.</b> Superpave hacimsel karışım tasarım kriterleri .....                                     | 77              |
| <b>Tablo 4.9.</b> Yük ve deformasyon kontrollü yorulma deneylerinin karşılaştırılması .....               | 88              |
| <b>Tablo 5.1.</b> Malatya’nın 22 yıllık en yüksek ve en düşük hava sıcaklık değerleri .....               | 104             |
| <b>Tablo 5.1.</b> Malatya’nın 22 yıllık en yüksek ve en düşük hava sıcaklık değerleri ,<br>(Devamı) ..... | 105             |
| <b>Tablo 5.2.</b> Sıcaklık ortalamaları ve standart sapmaları .....                                       | 105             |
| <b>Tablo 5.3.</b> %50 ve %98 güvenilirlik değerlerinde hesaplanan kaplama tasarım<br>sıcaklıkları .....   | 107             |
| <b>Tablo 5.4.</b> Saf bağlayıcı deney sonuçları .....   | 108             |
| <b>Tablo 5.5.</b> Penetrasyon ve yumuşama noktası deney sonuçları .....                                   | 110             |
| <b>Tablo 5.6.</b> Dönel viskozimetre deney sonuçları .....  | 112             |
| <b>Tablo 5.7.</b> Orijinal bağlayıcıların DSR deney sonuçları .....                                       | 116             |
| <b>Tablo 5.8.</b> Kısa dönem yaşlandırılmış bağlayıcıların DSR deney sonuçları .....                      | 117             |
| <b>Tablo 5.9.</b> BBR deney sonuçları .....   | 118             |
| <b>Tablo 5.10.</b> Uzun dönem yaşlandırılmış bağlayıcıların DSR deney sonuçları .....                     | 118             |
| <b>Tablo 5.11.</b> PG 58-Y ve PG 70-Y Superpave bağlayıcı şartnamesi .....                                | 119             |
| <b>Tablo 5.12.</b> Bağlayıcıların Superpave performans seviyeleri .....                                   | 120             |
| <b>Tablo 5.13.</b> Kullanılan agreganın fiziksel özellikleri .....  | 120             |
| <b>Tablo 5.14.</b> Başlangıç deneme karışımları .....   | 121             |
| <b>Tablo 5.15.</b> Deneme karışımlarının ölçülen hacim özgül ağırlıkları .....                            | 127             |
| <b>Tablo 5.16.</b> Deneme karışımlarının maksimum teorik özgül ağırlıkları .....                          | 127             |
| <b>Tablo 5.17.</b> Karışım-1 numunelerinin %4,97 bitüm içeriğindeki sıkıştırma<br>karakteristikleri ..... | 128             |
| <b>Tablo 5.18.</b> Karışım-2 numunelerinin %4,94 bitüm içeriğindeki sıkıştırma<br>karakteristikleri ..... | 130             |

|   |     |
|---|-----|
| <b>Tablo 5.19.</b> Karışım-3 numunelerinin %4,92 bitüm içeriğindeki sıkıştırma Karakteristikleri .....                | 131 |
| <b>Tablo 5.20.</b> Deneme karışımlarının Nini ve Ndes'deki %Gmm değerleri .....                                       | 131 |
| <b>Tablo 5.21.</b> Deneme karışımlarının sıkıştırma hesap özeti .....   | 132 |
| <b>Tablo 5.22.</b> Deneme karışımlarının sıkıştırma sonuçları ve şartname kriterleri .....                            | 134 |
| <b>Tablo 5.23.</b> Farklı asfalt içeriklerinde sıkıştırılan karışım numunelerinin fiziksel Özellikleri .....          | 135 |
| <b>Tablo 5.24.</b> Karışım numunelerinin %4,34 bitüm içeriğindeki sıkıştırma karakteristikleri .....                  | 135 |
| <b>Tablo 5.25.</b> Karışım numunelerinin %4,84 bitüm içeriğindeki sıkıştırma karakteristikleri .....                  | 136 |
| <b>Tablo 5.26.</b> Karışım numunelerinin %5,34 bitüm içeriğindeki sıkıştırma karakteristikleri .....                  | 136 |
| <b>Tablo 5.27.</b> Karışım numunelerinin %5,84 bitüm içeriğindeki sıkıştırma karakteristikleri .....                  | 136 |
| <b>Tablo 5.28.</b> Karışım numunelerinin hacim özellikleri ve yoğunluk değerleri .....                                | 137 |
| <b>Tablo 5.29.</b> Karışımların %4,88 tasarım asfalt bağlayıcı içeriğindeki özellikleri .....                         | 139 |
| <b>Tablo 5.30.</b> Kontrol karışım numunelerinin Gmb ve Gmm değerleri .....   | 139 |
| <b>Tablo 5.31.</b> Numunelerin Nmaks.'da %4,88 bitüm içeriğindeki sıkıştırma karakteristikleri .....                  | 139 |
| <b>Tablo 5.32.</b> Karışım numunelerinin Nmaks.'da %4,88 bitüm içeriğindeki yoğunluk değerleri .....                  | 140 |
| <b>Tablo 5.33.</b> Bütün karışımların hacimsel özellikleri .....  | 141 |
| <b>Tablo 5.34.</b> Koşullandırılmamış numunelerin marshall deney sonuçları .....                                      | 146 |
| <b>Tablo 5.35.</b> Koşullandırılmış numunelerin marshall deney sonuçları .....  | 147 |
| <b>Tablo 5.36.</b> Koşullandırılmamış numunelere 0°C sıcaklıkta uygulanan çekme dayanımı oranı deney sonuçları .....  | 153 |
| <b>Tablo 5.37.</b> Koşullandırılmamış numunelere 25°C sıcaklıkta uygulanan çekme dayanımı oranı deney sonuçları ..... | 154 |
| <b>Tablo 5.38.</b> Koşullandırılmış numunelere 25°C sıcaklıkta uygulanan çekme dayanımı oranı deney sonuçları .....   | 155 |
| <b>Tablo 5.39.</b> Tokluk indeksi deney sonuçları .....   | 162 |
| <b>Tablo 5.40.</b> Karışımların ITSM deney sonuçları .....  | 166 |
| <b>Tablo 5.41.</b> Karışımların 300 kPa gerilme seviyesinde indirekt çekme yorulma deney sonuçları .....              | 169 |
| <b>Tablo 5.42.</b> Karışımların 350 kPa gerilme seviyesinde indirekt çekme yorulma deney sonuçları .....              | 170 |
| <b>Tablo 5.43.</b> Karışımların 400 kPa gerilme seviyesinde indirekt çekme yorulma deney sonuçları .....              | 171 |
| <b>Tablo 5.44.</b> Yorulma deneyinden elde edilen değerler .....  | 182 |
| <b>Tablo 5.45.</b> Numunelere 0°C sıcaklıkta uygulanan LEKM yarım daire eğilme deney sonuçları .....                  | 187 |
| <b>Tablo 5.46.</b> Numunelere -10°C sıcaklıkta uygulanan LEKM yarım daire eğilme deney sonuçları .....                | 188 |
| <b>Tablo 5.47.</b> Numunelere -20°C sıcaklıkta uygulanan LEKM yarım daire eğilme deney sonuçları .....                | 189 |
| <b>Tablo 5.48.</b> Kiriş numunelerinin boyut ve ağırlıkları .....   | 194 |

|   |     |
|---|-----|
| <b>Tablo 5.49.</b> Kiriş numuneleri için gerekli agrega ve bitüm miktarları .....               | 195 |
| <b>Tablo 5.50.</b> Karışımlar için her bir elek üzerinde kalan agrega miktarları .....          | 195 |
| <b>Tablo 5.51.</b> Kiriş numunelere 0°C sıcaklıkta uygulanan LEKM deney sonuçları .....         | 199 |
| <b>Tablo 5.52.</b> Kiriş numunelere -10°C sıcaklıkta uygulanan LEKM deney sonuçları ...         | 200 |
| <b>Tablo 5.53.</b> Kiriş numunelere -20°C sıcaklıkta uygulanan LEKM deney sonuçları ...         | 201 |
| <b>Tablo 5.54.</b> Karışımların $K_{IC}$ değerlerinin denklemleri ve belirtme katsayıları ..... | 208 |

## SEMBOLLER LİSTESİ

|                          |  |
|--------------------------|--|
| $\sigma$                 | : Standart sapma   |
| $n$                      | : Örnekteki toplam gözlem sayısı   |
| $x_{ort}$                | : Örnekteki toplam gözlem sayısının aritmetik ortalaması   |
| $T_{20mm}$               | : Yüzeyden 20 mm derinlikteki kaplama tasarım yüksek sıcaklığı   |
| $T_{havamaks}$           | : En yüksek 7 günlük ortalama hava sıcaklığı   |
| $E$                      | : Derece olarak projenin uygulanacağı coğrafi bölgenin enlemi  |
| $T_{min}$                | : Kaplama yüzeyindeki tasarım düşük sıcaklığı  |
| $T_{havamin}$            | : En düşük 1 günlük ortalama hava sıcaklığı  |
| $M_1$                    | : RTFO deneyinde yaşlanmadan önceki ağırlık  |
| $M_2$                    | : RTFO deneyinde yaşlanmadan sonraki ağırlık   |
| $\epsilon_t$             | : Direkt çekme deneyinde uzama miktarı   |
| $G^*$                    | : Kompleks kayma modülü  |
| $\delta$                 | : Faz açısı  |
| $P_1, P_2, P_N$          | : Her bir agregada grubunun ağırlıkça yüzdesi  |
| $G_1, G_2, G_N$          | : Her bir agregada grubunun hacim ve zahiri özgül ağırlığı   |
| $V_{ba}$                 | : Absorbe edilen asfalt bağlayıcı hacmi  |
| $P_b$                    | : Bağlayıcı yüzdesi  |
| $P_s$                    | : Agregada yüzdesi   |
| $G_b$                    | : Bağlayıcının özgül ağırlığı  |
| $V_a$                    | : Hava boşluğu hacmi   |
| $V_{be}$                 | : Efektif bağlayıcı hacmi  |
| $S_n$                    | : Agregada karışımındaki nominal maksimum elek boyutu  |
| $P_{bi}$                 | : Karışım ağırlığına göre bağlayıcı yüzdesi  |
| $W_s$                    | : Agreganın ağırlığı   |
| $W_b$                    | : Toplam agregada ağırlığına göre alınacak bağlayıcı miktarı   |
| $G_{mm}$                 | : Asfalt karışımının maksimum özgül ağırlığı   |
| $G_{mb}$                 | : Sıkıştırılmış karışımın hacim özgül ağırlığı   |
| $P_{0,075}$              | : Karışımında kullanılan 0,075 mm'lik (No. 200) elekten geçen filler malzemesinin agregada karışımındaki ağırlıkça yüzdesi |
| $G_b$                    | : Asfaltın özgül ağırlığı  |
| $G_{se}$                 | : Agregada karışımının efektif özgül ağırlığı  |
| $VMA$                    | : Absorbe edilen asfalt bağlayıcı hacmi  |
| $VFA$                    | : Asfaltla dolu mineral agregadaki boşluk yüzdesi  |
| $W_m$                    | : Numunenin ağırlığı   |
| $\gamma_{su}$            | : Suyun yoğunluğu  |
| $V_{mx}$                 | : Numunenin hesapla bulunan hacmi  |
| $d$                      | : Kalıbın çapı   |
| $h_x$                    | : Sıkıştırma esnasında numunenin yüksekliği  |
| $C$                      | : Düzeltme faktörü   |
| $G_{mb}(\text{ölçülen})$ | : Sıkıştırılmış numunenin ölçülen hacim özgül ağırlığı   |
| $G_{mb}(\text{tahmini})$ | : Sıkıştırılmış numunenin hesaplanan tahmini hacim özgül ağırlığı  |
| $G_{mb}(\text{düz.})$    | : Herhangi bir yoğurma için düzeltilmiş hacim özgül ağırlığı   |
| $DP$                     | : Filler oranı   |
| $h$                      | : Numune yüksekliği  |
| $J$                      | : Absorbe su hacmi   |



|  |   |
|--|---|
| <b>B'</b>  | : Vakum işleminden sonra numunenin doygun kuru yüzey ağırlığı                                 |
| <b>B</b>   | : Vakum işleminden önce numunenin doygun kuru yüzey ağırlığı                                  |
| <b>S'</b>  | : Doygunluk derecesi  |
| <b>I</b>   | : Hava boşluğu hacmi  |
| <b>V</b>   | : Numune hacmi  |
| <b>TS</b>  | : Çekme dayanımı  |
| <b>P<sub>mak</sub></b>                               | : Kırılmaya neden olan maksimum yük   |
| <b>TS<sub>yaş</sub></b>                              | : Koşullandırılmış numunelerin çekme dayanımı değeri  |
| <b>TS<sub>kuru</sub></b>                             | : Koşullandırılmamış numunelerin çekme dayanımı değeri  |
| <b>S<sub>m</sub></b>                                 | : İndirekt çekme rijitlik modülü  |
| <b>F</b>   | : İndirekt çekme rijitlik modülü deneyinde maksimum dikey yük                                 |
| <b>H</b>   | : 5 yük tekrarı sonucunda oluşan ortalama yatay deformasyon                                   |
| <b>L</b>   | : Ortalama numune yüksekliği  |
| <b>R</b>   | : Poisson oranı   |
| <b>N<sub>f</sub></b>                                 | : Yorulma ömrü  |
| <b>k<sub>1</sub> ve k<sub>2</sub></b>                | : Malzeme karakteristikleri   |
| <b>r<sub>p</sub></b>                                 | : Çatlak ilerleme oranı   |
| <b>N<sub>p</sub></b>                                 | : Çatlak ilerlemesi için gerekli yük tekrar sayısı  |
| <b>δ<sub>f</sub></b>                                 | : Bozulma anında toplam deformasyon   |
| <b>δ<sub>i</sub></b>                                 | : Çatlak başladığı andaki toplam deformasyonu   |
| <b>K<sub>IC</sub></b>                                | : Kritik gerilme şiddet çarpanı   |
| <b>τ</b>   | : Kayma gerilmesi   |
| <b>a</b>   | : Yarı çatlak uzunluğu  |
| <b>ΔW</b>  | : Maksimum düşey deformasyon  |
| <b>ε<sub>mak</sub></b>                               | : Maksimum birim şekil değiştirme   |
| <b>b</b>   | : Yarım daire eğilme deneylerinde numune kalınlığı  |
| <b>P<sub>25</sub></b>                                | : Bitümün 25 <sup>0</sup> C'deki penetrasyon değeri   |
| <b>T<sub>YN</sub></b>                                | : Yumuşama noktası  |
| <b>N<sub>i</sub>, N<sub>f</sub>, N<sub>mak</sub></b> | : Çatlak başlangıcı, yorulma ömrü ve maksimum yük tekrar sayıları                             |
| <b>δ<sub>i</sub>, δ<sub>f</sub>, δ<sub>mak</sub></b> | : Çatlak başlangıcı, yorulma ömrü ve maksimum yük tekrar sayılarındaki deformasyon miktarları |
| <b>R<sup>2</sup></b>                                 | : Belirtme katsayısı  |

## KISALTMALAR

|                  |  |
|------------------|--|
| <b>SBR</b>       | : Stiren Butadien Kauçuk   |
| <b>SBS</b>       | : Stiren Butadien Stiren   |
| <b>EVA</b>       | : Etilen Vinil Asetat  |
| <b>EBA</b>       | : Etilen Butil Akrlat  |
| <b>PVC</b>       | : Poli Vinil Klorid  |
| <b>PE</b>        | : Polietilen   |
| <b>PP</b>        | : Polipropilen   |
| <b>PS</b>        | : Polistiren   |
| <b>BSK</b>       | : Bitümlü Sıcak Karışım  |
| <b>SUPERPAVE</b> | : Superior Performing Asphalt Pavement (Yüksek Performanslı Asfalt Kaplama)  |
| <b>KGM</b>       | : Karayolları Genel Müdürlüğü  |
| <b>TSE</b>       | : Türk Standartları Enstitüsü  |
| <b>SHRP</b>      | : Strategic Highway Research Program (Stratejik Karayolu Araştırma Programı)   |
| <b>AASHTO</b>    | : American Association of State Highway and Transportation Officials (Amerikan Devlet Karayolu ve Ulaştırma Birliği) |
| <b>RTFOT</b>     | : Rolling Thin Film Oven Test (Dönel İnce Film Halinde Isıtma Deneyi)  |
| <b>PAV</b>       | : Pressure Aging Vessel (Basınçlı Yaşlandırma Aleti)   |
| <b>RV</b>        | : Rotational Viscometer (Dönel Vizkozimetre)   |
| <b>DSR</b>       | : Dynamic Shear Rheometer (Dinamik Kayma Reometresi)   |
| <b>BBR</b>       | : Bending Beam Rheometer (Kiriş Eğme Reometresi)   |
| <b>DDT</b>       | : Direct Tensile Tester (Doğrudan Çekme Deneyi)  |
| <b>PG</b>        | : Performance Grade (Performans Sınıfı)  |
| <b>ETDY</b>      | : Eşdeğer Standart Tek Dingil Yüğü   |
| <b>TSR</b>       | : Çekme Dayanımı Oranı   |
| <b>ITSM</b>      | : Indirect Tensile Stiffness Modulus (İndirekt Çekme Rijitlik Modülü)  |
| <b>UMATTA</b>    | : Universal Material Testing Apparatus (Üniversal Malzeme Deney Aleti)   |
| <b>İÇYD</b>      | : İndirekt Çekme Rijitlik Modülü   |
| <b>LVDT</b>      | : Linear Variable Differential Transformer (Doğrusal Değişken Türevsel Dönüştürücü)                                  |
| <b>LEKM</b>      | : Lineer Elastik Kırılma Mekaniği  |
| <b>EPKM</b>      | : Elastik-Plastik Kırılma Mekaniği   |
| <b>SCB</b>       | : Semi-Circular Bending (Yarım Daire Eğilme)   |
| <b>TÜPRAŞ</b>    | : Türkiye Petrol Rafinerileri Anonim Şirketi   |
| <b>PI</b>        | : Penetrasyon İndeksi  |
| <b>SGC</b>       | : Superpave Gyrotory Compactor (Superpave Yoğurmalı Sıkıştırıcı)   |
| <b>MQ</b>        | : Marshall Quotient (Marshall Oranı)   |

# 1. GİRİŞ

## 1.1. Çalışmanın Önemi ve Konusu

Artan nüfusa ve teknolojik gelişmelere bağlı olarak karayollarındaki ağır taşıt sayısı ve dingil yükleri gün geçtikçe artmaktadır. Bu artış, kaplama yapılarının ömürlerinin beklenen sürelerden daha önce bozulmasına, dolayısıyla güvenlik, zaman, konfor ve maliyet açısından olumsuzluklarla karşılaşılmasına neden olmaktadır. Karayollarının uzun vadede daha iyi performans göstermesi için tasarım aşamasında trafik koşulları kadar alt ve üstyapı tabakalarında kullanılacak malzemelerin özelliklerine de büyük önem verilmesi gerekmektedir.

Temel olarak karayolu üstyapıları; rijit, esnek ve kompozit olmak üzere üç ana sınıfa ayrılmaktadır. Rijit üstyapılar, ağır ve yüksek trafik hacmine sahip yollarda granüler alttemel tabakası üzerine yapılan beton plaklardan oluşmaktadır. Çok tabakalı bir yapıda olan esnek üstyapıların alttemel ve temel tabakaları dren kabiliyeti yüksek granüler malzemeler kullanılarak, kaplama tabakaları ise yüksek stabilite ve sürüş konforu sağlamak amacıyla asfalt karışımlar kullanılarak yapılmaktadır. Kompozit üstyapılar, zamanla bozulmuş rijit üstyapıların üzerine asfalt karışım uygulanarak veya bozulmuş esnek üstyapıların üzerine beton kaplama yapılarak elde edilmektedir [1]. Dünyanın birçok ülkesinde olduğu gibi Ülkemizde de karayolu üstyapıları genel olarak esnek üstyapı şeklinde yapılmaktadır.

Sıkıştırılmış veya iyileştirilmiş doğal zemin üzerine yerleştirilen alttemel, temel ve kaplama tabakalarından oluşan esnek üstyapılarda temel ve alttemel tabakaları yük taşıma kabiliyetini arttırmak, deformasyonları azaltmak ve drenajı sağlamak gibi nedenlerden dolayı uygulanırken, kaplama tabakaları da taşıtların güvenli ve konforlu bir şekilde hareket etmesi amacıyla uygulanmaktadır. Temel olarak bitüm ve agrega kullanılarak yapılan kaplama yapıları çeşitli şekillerde uygulanabilmektedir. Esnek kaplama yapıları içerisinde ise en yüksek performansı, uygun miktarda bitüm ve uygun gradasyona sahip agreganın ısıtılıp karıştırılması sonucu elde edilen bitümlü sıcak karışımlar (BSK) göstermektedir.

Bitümlü sıcak karışımlarda kohezyon, bitümlü bağlayıcı tarafından karşılanırken agrega karışımının içsel sürtünme direncini ve stabilitesini sağlamaktadır. Ayrıca agrega

tanelerini birbirine bağlayarak trafik yükleri altında dağılmasını önleyen bitümlü bağlayıcılar oluşturdukları düzgün yüzeyler ile sürüş konforunu sağlamakta, kohezyonu ile karışımın stabilitesini arttırmakta ve karışımın boşluklarını doldurarak geçirimsizliğini sağlamaktadır. BSK'larda ağırlıkça % 5–7 gibi düşük bir oranda kullanılan bitümlü bağlayıcılar karışım performansı üzerinde de oldukça etkilidir [2].

Bitümlü bağlayıcılar, kaplama cinsine ve kullanım amacına bağlı olarak asfalt çimentoları, katbek asfaltlar ve emülsiyonlar gibi gruplara ayrılabilir. Bütün bitümlü bağlayıcılarda ana bağlayıcı görevini asfalt çimentosu üstlenmektedir [3]. Asfalt çimentolarının kullanılabilirliği, birçok Avrupa ülkesinde olduğu gibi Ülkemizde de TS 1081 EN 12591 standardına göre tespit edilmektedir. Bu standartta bağlayıcı kıvamları ve sınıfları penetrasyon veya viskozite değerlerine göre belirlenmekte, uygulanan diğer standart bağlayıcı deneyleri ile de kullanılabilirlikleri araştırılmaktadır. Karayolları Genel Müdürlüğü tarafından kıvamı yüksek bitümlerin sıcak iklimli bölgelerde, kıvamı düşük bitümlerin ise soğuk iklimli bölgelerde kullanılması tavsiye edilmektedir [4].

Esnek kaplamalarda bağlayıcı olarak kullanılan bitüm, yüksek taşıt hızlarında ve düşük sıcaklıklarda elastik katı, düşük taşıt hızlarında ve yüksek sıcaklıklarda ise viskoz sıvı özelliği göstermektedir. Uygulamada ise şartlar uç noktalara ulaşmadığı için bitüm genellikle viskoelastik özellik sergilemektedir.

Kaplamanın maruz kaldığı trafik yüklerinden, yüksek ve düşük sıcaklıklarda oluşan gerilmelerden kaynaklanan bozulmalara karşı kaplamaların dayanımlarını arttırmak amacıyla kullanılacak yöntemlerden biri malzeme özelliklerinin iyileştirilmesidir. Bu amaçla genellikle bitüme polimer kökenli katkı maddeleri ilave edilmektedir. Polimerler kendi aralarında plastikler, elastomerler, işlenmiş kauçuk ve fiberler olarak dört ana gruba ayrılırken plastikler; termoplastikler ve termosetler olarak elastomerler ise doğal ve yapay kauçuk olarak iki alt gruba ayrılmaktadır [5]. Bu katkı maddeleri içerisinde en çok kullanılan stiren-butadien-stiren (SBS) blok kopolimerleridir. SBS modifiyeli bitümlerde modifikasyonun etkili şekilde oluşabilmesi için SBS konsantrasyonu ve yapısı, bitümün yapısı, karıştırma sıcaklığı ve süresi gibi bir çok faktöre ihtiyaç vardır. Yapılan bir çok çalışma sonucunda SBS'nin bitümün rijitliğini arttırmasına rağmen düşük sıcaklıklarda çatlama, yüksek sıcaklıklarda tekerlek izi oluşumu ve yorulmaya karşı dayanımı arttırdığı belirlenmiştir [6-10]. Yapılan çeşitli çalışmalarda da polietilen (PE), polipropilen (PP), poli vinil klorid (PVC), polistiren (PS) ve etilen vinil asetat (EVA) gibi termoplastik

malzemeler bitüm modifikasyonunda denenmiş ve normal servis sıcaklığında bitümün sertliğini ve viskozitesini arttırdıkları tespit edilmiştir [11-14].

Kaplama performansını arttırmak amacıyla Amerika Stratejik Karayolu Araştırma Programı (SHRP) dahilinde yapılan 5 yıllık çalışmaların sonucunda kaliteli malzemelerin kullanımını ve uygun şekilde tasarımını içeren Yüksek Performanslı Asfalt Kaplama (Superpave) sistemi geliştirilmiştir. Superpave sisteminde kullanılan bağlayıcı deneylerinde, uygulama bölgesindeki iklim koşulları göz önünde bulundurularak tekerlek izi, düşük sıcaklık ve yorulma çatlaklarını engellemek amacıyla bağlayıcılar performansa dayalı olarak incelenmektedir [15]. Sistemde, bağlayıcıların tekerlek izine ve yorulma çatlaklarına karşı dayanımlarını tespit edebilmek amacıyla dinamik kesme reometresi (DSR), düşük ısı çatlaklarına karşı dayanımı belirlemek amacıyla kiriş eğme reometresi (BBR) ve bağlayıcıların işlenebilirliklerini belirlemek amacıyla dönel viskozimetre (RV) deneyleri kullanılmaktadır.

Bitümlü bağlayıcıların yaşlanması, kısa dönem içerisinde depolama, karıştırma, taşıma ve serim sırasında, uzun dönem içerisinde ise servis ömrü boyunca meydana gelmektedir. Yapılan araştırmalar yol hizmete açılıncaya kadar bağlayıcıda meydana gelen yaşlanmanın, toplam yaşlanma miktarının yaklaşık % 70'ini oluşturduğunu göstermektedir [16]. Asfalt hazırlama tesislerinde karıştırma sırasında meydana gelen kısa süreli yaşlanma, laboratuarda RTFOT (Dönel ince film halinde ısıtma deneyi) kullanılarak tespit edilmektedir [17]. Kaplama performansını tam olarak değerlendirebilmek için yaşlanma parametrelerinin göz önünde bulundurulması büyük önem arz etmektedir. Bu nedenle Superpave sisteminde bağlayıcıların kısa süreli yaşlanma özelliklerini tespit edebilmek amacıyla RTFOT yöntemi kullanılmaktadır.

Malzemelerde çatlakların oluşum ve ilerleme mekanizmalarını inceleyen mekaniğin alt dalı olan kırılma mekaniği, çelik ve beton gibi bir çok inşaat malzemesinde uzun zamandır uygulanmasına rağmen asfalt karışımlarda kullanımı yakın bir geçmişe dayanmaktadır. Yarım daire geometrisine sahip bitümlü sıcak karışım numuneler üzerinde kırılma mekaniğinin uygulanması ilk olarak Mull ve ekibi tarafından 2002 yılında gerçekleştirilmiştir [18]. Yöntemin işleyişi sırasıyla; sıkıştırılmış daire şeklindeki numunenin kesilerek iki adet yarım daire numunesi elde edildikten sonra numunenin kesilen ve düz olan yüzeyine çentik açılmakta ve numuneye tek eksenli yükleme deneyi yapılmaktadır [19]. Deney yöntemi bir çok makale ve tez çalışmasında kullanılmış ve

başarılı sonuçlar elde edilmiştir [20, 21]. Benzer şekilde kiriş numunelerin alt yüzeyine çentik açılarak aynı deney uygulanmaktadır [22].

## 1.2. Çalışmanın Amacı ve İzlenen Yol

Birçok ülkede olduğu gibi ülkemizde de en çok kullanılan üstyapı çeşidi olan karayolu esnek üstyapılarında kaplama tabakaları; bitümlü sathi kaplama, soğuk karışım asfalt kaplama ve bitümlü sıcak karışım (BSK) olmak üzere 3 şekilde uygulanabilmektedir. Bu esnek kaplama çeşitleri, sıkıştırılmış veya iyileştirilmiş doğal zemin üzerine yerleştirilen alttemel ve temel tabakalarının üzerine teşkil edilmektedir.

Bu tez çalışmasında; bitüm modifikasyonunda en sık tercih edilen iki farklı polimer olan SBS ve EVA kopolimerleri kullanılmıştır. Uygulama bölgesi olarak Malatya ili seçilmiştir. Malatya Meteoroloji Bölge Müdürlüğü'nden alınan son 20 yıla ait ardı ardına 7 günlük en yüksek hava sıcaklıkları ve en düşük 1 günlük sıcaklık verileri kullanılarak Superpave yöntemine göre Malatya için uygun bağlayıcı performans seviyesi belirlenmiştir. TÜPRAŞ rafinerisinden temin edilen B 160/220 sınıfı bağlayıcı Superpave bağlayıcı performans deneylerine (dinamik kesme reometresi, kiriş eğme reometresi, dönel ince film halinde ısıtma, dönel viskozimetre) tabi tutularak bağlayıcının performans seviyesi (PG) tespit edilmiştir. Farklı oranlarda (%2, 3, 4 ve 5) polimerler saf bitümlü bağlayıcıya (B 160/220) katılmış ve saf bağlayıcıya uygulanan Superpave deneylerine tabi tutulmuştur. Bağlayıcı deneyleri sonucunda Malatya iline uygun katkı oranının %4 olduğu belirlenmiştir. Aynı oranda katkı kullanımı, katkı türlerinin karşılaştırılmasını kolaylaştırmıştır.

Agrega malzemesi olarak Elazığ Karayazı Bölgesi'nden temin edilen kalker kullanılmıştır. Agreg a malzemesinin fiziksel özellikleri tespit edilerek uygun agrega gradasyonu seçilmiş ve aynı performans seviyesine sahip üç farklı bağlayıcı ile bitümlü sıcak karışım numuneleri hazırlanmıştır. Böylece her bir karışım türü için tasarım bitüm içerikleri belirlenmiştir.

Son olarak tasarım bitüm içeriklerinde hazırlanan numuneler kırılma dayanımı deneylerine (yarım daire ve üç nokta eğilme) tabi tutulmuştur. Yarım daire numuneler yoğurmalı presle, kiriş numuneler ise merdaneli pres ile sıkıştırılmıştır. Kiriş ve daire numuneler, standart deney boyutlarına göre kesilerek hazırlanmış, özel deney düzeneği ve veri toplama sistemi kullanılarak yük ve deformasyonlar tespit edilmiştir.

Tasarım bitüm içeriklerinde her bir deney için en az üç numune hazırlanmıştır. Bu numuneler üzerinde;

- Marshall stabilite ve akma deneyi,
- Kalıcı Marshall stabilitesi deneyi,
- Nem hasarına karşı dayanım deneyi,
- Koşullandırılmamış numuneler üzerinde tokluk indeksi,
- 10°C, 20°C ve 30°C’de indirekt çekme rijitlik modülü deneyi
- 25°C’de deformasyon kontrollü yorulma deneyi
- Yarım daire numuneler üzerinde kırılmaya karşı dayanım deneyleri
- Kiriş numuneler üzerinde kırılma dayanımı yapılmıştır.

Bitümlü bağlayıcı ve karışımların özellikleri üzerinde SBS ve EVA’nın etkilerinin incelendiği çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Hem SBS hem de EVA bitümlü bağlayıcı ve karışımların özelliklerini iyileştirmesine rağmen bağlayıcının viskozitesini önemli oranda arttırmaktadır. Dolayısıyla plentte agregayla karıştırma sırasında SBS ve EVA modifiyeli bitümler daha yüksek sıcaklıklara ihtiyaç duymaktadır. Karayolu uygulamalarında en çok kullanılan SBS çeşidi olan SBS D1101 polimeri ile benzer etkiye sahip olan fakat viskoziteyi SBS D1101 kadar arttırmayan SBS MD243 katkısı geliştirilmiştir. Bu çalışmada SBS D1101, SBS MD243 ve EVA katkılarının bitümlü bağlayıcı ve karışım özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışmada bu katkıların özellikle bitümlü sıcak karışımların yorulma ve çatlak ilerleyişine karşı dayanımlarına etkileri değerlendirilmiştir.

## 2. BITÜMLÜ SICAK KARIŞIMLAR

Karayolu üstyapı kaplama tabakaları; sathi kaplama veya bitümlü karışım olarak yapılabilmektedir. Karayolları Genel Müdürlüğü tarafından düşük trafikli ( $T_{8.2} < 3 \times 10^6$ ) yollarda kaplama tabakası olarak sathi kaplama uygulamaları önerilmektedir. Maliyeti düşük ve kayma direnci yüksek bir yol yüzeyi sathi kaplama uygulanması ile elde edilebilmektedir. Bitümlü karışımlar kullanılan bağlayıcı türüne göre soğuk ve sıcak karışımlar olarak ikiye ayrılmaktadır. Soğuk karışımlarda bitümlü bağlayıcı olarak, sıvı petrol asfaltları veya emülsiyon asfaltlar kullanılmaktadır. Bakım ve onarım malzemesi olarak kullanılan ve soğuk karışım olan roadmiks yolda hazırlanabilmektedir. Soğuk karışımları plentte de üretmek mümkündür. Sıcak karışımlarda ise işlenebilirliği sağlamak amacıyla ısıtılmış asfalt çimentoları veya modifiye bitümler kullanılmaktadır. Sıcak karışımlarda bitümler viskozite değerleri ile belirlenen karıştırma sıcaklığına kadar ısıtılmaktadır. BSK'larda, bitüm ile agrega arasındaki sıcaklık farkı maksimum 15°C olmalıdır [3].

Orta ve ağır trafikli yollarda, trafik yüklerini taşımak ve üstyapının diğer tabakalarını, doğa koşullarının olumsuz etkilerinden korumak amacıyla bitümlü sıcak karışımlar kullanılmaktadır. Karayollarında BSK; bitümlü temel, binder ve aşınma olarak üç tabaka halinde uygulanmaktadır. BSK, kırılmış ve elenmiş kaba agrega, ince agrega ve mineral fillerin belirli gradasyon limitlerinde belirli bir dizayna uygun olarak bitümlü bağlayıcı ile bir plentte karıştırılarak yeterli temel ya da beton kaplamalar üzerine bir veya birden fazla tabaka halinde sıcak olarak ve projesindeki plan, profil ve enkesitlere uygun şekilde uygulanmasıyla teşkil edilmektedir [23]. Hava sıcaklığı 5°C'nin altında ise bitümlü sıcak karışımlar dökülmemeli, 130°C sıcaklığın altına düşmeden sıkıştırma işlemine başlanmalı ve 80°C'nin altına düşmeden de sıkıştırma işlemi tamamlanmalıdır.

### 2.1. Bitümlü Sıcak Karışımlarda Aranılan Özellikler

Bitümlü sıcak karışımların, hizmet süresi boyunca istenen performansı sağlayabilmesi için uygun şekilde tasarlanması ve karışımların stabilite, rijitlik, dayanıklılık, yorulma direnci, esneklik (fleksibilite), kayma direnci, geçirgenlik (permeabilite) ve işlenebilirlik özelliklerine sahip olması gerekmektedir [3, 24].



### 2.1.1. Bitümlü Sıcak Karışımların Stabilitesi

Stabilite, bitümlü sıcak karışımların trafik yüklerine, ötelenme ve tekerlek izlerine karşı direnç gösterme yeteneğidir. Stabilite yetersizliği, kaplamalarda çökme, tekerlek izi ve ondülasyon gibi bozulmalara neden olmaktadır. Ancak, stabilitenin çok yüksek olması esnekliği azaltarak çatlak oluşmasına neden olacağı için fazlası da istenmemektedir. Bitümlü sıcak karışımların stabilitesine etki eden parametreler; karışımın kayma mukavemeti, ısı ve karışımdaki danelerin yer değiştirmeye karşı direnci olan eylemsizlik (atalet) direncidir [3, 24-26]. Sıcak asfalt karışımların kayma mukavemeti ( $\tau$ ) aşağıdaki (2.1) bağıntısı ile tanımlanır [3].

$$\tau = c + \sigma \tan \theta \quad (2.1)$$

Burada  $\theta$ , agrega daneleri arasındaki sürtünme ve kilitlenmeden kaynaklanan içsel sürtünme açısını,  $c$  agrega ile asfalt arasındaki bağ (adezyon) kuvvetini yani kohezyonu,  $\sigma$  ise normal gerilmeyi ifade etmektedir. Dolayısıyla içsel sürtünme agrega tarafından, kohezyon ise bitümlü bağlayıcı tarafından sağlanmaktadır. İçsel sürtünme açısı agreganın yüzey dokusuna, gradasyonuna, dane şekline, karışımın yoğunluğuna ve asfalt miktarı ile tipine bağlıdır. Kohezyon ise yükleme hızı, yüklenen alan ve sıcaklıkla ters orantılı olan asfalt viskozitesinin etkisi ile doğrudan değişiklik göstermektedir [3, 24].

Sonuç olarak;

- Agrega pürüzlülüğü, köşeliliği ve yoğunluğu arttıkça,
- Karışımın boşluk oranı azaldıkça ve yoğunluğu arttıkça,
- Asfaltın viskozitesi arttıkça veya katılaştıkça,
- Yükleme hızı arttıkça,
- Asfalt tabakası kalınlığı arttıkça, sıcak asfalt karışımların stabilitesi artmaktadır [1].

Isı, stabiliteye etki eden diğer bir parametredir. Agrega-bitüm karıştırma sıcaklığı arttıkça bitümlü bağlayıcının viskozitesi azalarak daha rahat bir şekilde agreganın boşluklarına girebilmektedir. Böylece karışımın stabilitesinin artması sağlanmaktadır. Diğer taraftan bitüm termoplastik bir malzeme olduğundan yüksek ortam sıcaklıklarında bitüm ısıyı absorbe etmekte ve deformasyon direnci büyük oranda azalmaktadır. Düşük

ısılarda ise bitümlü bağlayıcı sertleşerek çatlak oluşumuna neden olmaktadır. Çatlaklar da kütesel ayrışmalara ve stabilitenin azalmasına sebep olmaktadır.

### 2.1.2. Bitümlü Sıcak Karışımların Rijitliği

Bitümlü sıcak karışımlar, viskoelastik ve termoplastik malzemeler olduğundan mekanik özelliklerini belirlemek için “Rijitlik Modülü” kullanılmaktadır. Rijitlik modülü ( $S_m$ ), elastik malzemelerin elastikiyet modülüne benzetmekle beraber ısı ve yükleme hızına bağlı olarak aşağıdaki bağıntı ile belirlenmektedir.

$$S_{m(t, T)} = \sigma / \varepsilon \quad (2.2)$$

$\sigma$ : Gerilme,  $\varepsilon$ : Şekil değiştirme (deformasyon).

Burada T ısı, t yükleme süresi veya hızı olup karışıma giren malzemelerin temel özellikleri ikinci derecede rol oynamaktadır. Rijitlik, bitümlü sıcak karışımların farklı yükleme süresi, hız ve sıcaklıklardaki gerilme ve deformasyon arasındaki ilişkinin ifadesidir. Yani genel olarak rijitlik; yükleme süresi ve ısı azaldıkça veya yükleme hızı, karışımın yoğunluğu ve asfaltın viskozitesi arttıkça artacaktır [1].

### 2.1.3. Bitümlü Sıcak Karışımların Dayanıklılığı (Durabilitesi)

Durabilite; bitümlü sıcak karışım kaplamanın, trafik, su, hava etkilerine ve ısı değişikliklerine dayanıklılığını ifade etmektedir. BSK stabil olduğu kadar durabil de olmalıdır. Durabilite, diğer bir tanımlamayla; kaplamanın aşınmaya, kabarmaya, soyulmaya ve oksidasyona dayanıklılığı anlamına gelmektedir. Kaplamanın aşınmaya dayanıklılığı daha çok agreganın aşınmaya olan dayanıklılığını ifade etmektedir. Agregada sert ve sağlam olduğu oranda kaplama durabil olur [27]. Dayanıklılık özelliği, genellikle yüksek asfalt içeriği, yoğun veya iyi derecelenmiş agregada gradasyonu ve iyi sıkıştırılmış geçirimsiz karışımlar sayesinde iyileşmektedir. Karışımdaki asfalt miktarının artırılması ile agregada danelerini saran ince film tabakası kalınlaşacak ve daha kalın asfalt filmler yaşlanmaya (sertleşmeye) karşı direncin artmasını sağlayacak ayrıca boşluk miktarını azaltarak karışıma hava ve su girişini zorlaştıracaktır. Ancak, daha kalın asfalt filminin

tekerlek izi, deformasyon ve sıcak havalarda kasma oluşumuna yatkın olduğu göz ardı edilmemelidir.

Su etkisine karşı koymak için de aynı şartlarla birlikte daha yoğun bir karışım kullanmak, asfaltın agregadan soyulmasına karşı daha yüksek dirençli olmasını sağlayacaktır. Karışımda yetersiz oranda asfalt kullanmak, trafiğin aşındırma etkisi ile agreganın yüzeyden kopmasına sebep olacaktır. Ayrıca, sıcak karıştırma işleminde asfaltın aşırı derecede ısıtılması durumunda, yaşlanmanın etkisiyle ileriki aşamalarda asfalt daha kırılgan olacaktır ve bunun sonucunda da ayrışmalar ortaya çıkacaktır. Karışımın aşınması doğal olarak agreganın aşınma özelliğine de bağlı olduğundan sıcak karışımda kullanılan agreganın kırılmış, elenmiş olması şartı yanında, aşınmaya, soyulmaya ve ufalanmaya karşı dirençli olması da istenmektedir [3, 24-26].

#### **2.1.4. Bitümlü Sıcak Karışımların Yorulma Mukavemeti**

Bitümlü sıcak karışımların yorulma mukavemeti, tekerlek yüklerinin geçmesinden doğan tekrarlı gerilmelere karşı, elastik deformasyon oluşumuna müsaade ederek, kaplamada çatlamlar oluşmadan karşı koyabilme yeteneğidir. Bitümlü sıcak karışımların yorulma direnci üzerinde asfalt içeriği ve agrega gradasyonunun önemi büyüktür. Karışımda kasmaya neden olmayacak şekilde yüksek oranda bitüm kullanılması ve yoğun gradasyonlu karışımlar kullanılması yorulma ömrünün artmasını sağlamaktadır [24, 28]. Yorulma mukavemeti; kaplamanın rijitliği, yoğunluğu ile kalınlığı arttıkça ve eğilme gerilmesi azaldıkça, asfalt yumuşadıkça ve miktarı arttıkça artış göstermektedir [3].

Çoğu tasarım ve değerlendirme yöntemi, uzun dönemli bozulmalar için yorulma çatlaklarını temel almaktadır. Yorulma çatlaklarının gelişimi, bitümlü sıcak karışım tabakanın tabanında oluşan çekme gerilmeleriyle ilişkilidir.

Yorulma çatlakları, bir gerilme olayı olarak göz önüne alınmaktadır. Bu olay malzemenin anında bozulmasına neden olacak gerilmeden daha düşük olarak çekme gerilmesinin tekrarlı olarak uygulanmasıdır. Bunun sonucunda malzeme içerisinde yorulma çatlakları başlar ve ilerlemeyi sürdürür. Çekme gerilmesi veya çekme deformasyonu temel alınarak bu ilişki aşağıdaki şekilde gösterilebilir.

$$N_f = a(1/X)^b \quad (2.3)$$

$N_f$ : Yorulma çatlağına neden olan yük tekrar sayısı (yorulma ömrü)

X: Uygulanan şekil değiştirme veya gerilme değeri,

a ve b: Bitümlü karışımın özelliklerine bağlı laboratuarda belirlenen katsayılar.

Yukarıda belirtilen denklem üstyapı tasarımında ve analizinde kullanılabilir. Bu denkleme yük tekrar frekansı ve karışım sıcaklığındaki değişiklikler de göz önüne almak amacıyla “karışım rijitliği” terimi eklenmiştir. Bu durumda denklem;

$$N_f = a (1/X)^b (S_{mix})^c \quad (2.4)$$

Burada  $S_{mix}$  karışımın rijitlik modülünü ve c, kalibrasyon katsayısını ifade etmektedir. Gerilme değıştikçe rijitlik modülü de değışeceğinden denklem, uygulanan gerilmelerin belirli bir değeri için kullanılabilir.

Kullanılmakta olan üstyapılar için deformasyonlar, sonraki yer değıştirmeler, tekerlek basınçları, aks yükleri ve tipleri nedeniyle farklılık göstererek yanıtıcı olabilmektedir. Buna göre karışık yüklerin bozucu etkilerini bir araya getirmek için bir takım bağıntılara gerek vardır. Bu bağıntıların en yaygın olanı aşağıda verilmiştir.

$$N_f = \frac{n_1}{N_{1f}} + \frac{n_2}{N_{2f}} + \dots + \frac{n_i}{N_{if}} + \dots + \frac{n_m}{N_{mf}} \quad (2.5)$$

Burada  $N_f$  deformasyon yinelenme oranları toplamı, i üstyapının kritik kesitinde i. Düzeyde uygulanan deformasyon,  $n_i$  i. deformasyonun yinelenme sayısı,  $N_{if}$  i düzeydeki deformasyonun bozulmaya neden olan yinelenme sayısıdır.

Miner hipotezi olarak adlandırılan lineer eşitlikte yinelenme oranlarının toplamının ( $N_f$ ) bire ulaşması durumunda üstyapının bu karışık yük uygulaması altında bozulduğu kabul edilir. Üstyapı sistemlerinin yorulma işleyişini kestirebilmek amacıyla yukarıda verilen iki genel denklem temel alınarak değışik yorulma modelleri geliştirilmiştir.

Nottingham araştırmacıları, eğilme deformasyonu ile kırılmaya neden olan yüklenme sayısı, asfalt içeriği ve yumuşama noktası arasında genel bir ilişki kurmuşlardır.

$$\log \varepsilon_t = \frac{14.39 \log V_B + 24.2 \log T_{RB} - 40.7 - \log N_f}{5.13 \log V_B + 8.63 \log T_{RB} - 158} \quad (2.6)$$

Burada  $\varepsilon_t$  izin verilebilir eğilme deformasyonunu,  $N_f$  kırılmaya neden olabilecek yüklenme sayısını,  $V_B$  asfalt bağlayıcının hacmini,  $T_{RB}$  yumuşama noktasını göstermektedir. Shell yorulma deformasyonunu aşağıdaki bağıntıyla ifade etmiştir.

$$\varepsilon_t = (0.856xV_B + 1.08)xS_{mix}^{-0.36}xN^{-0.2} \quad (2.7)$$

Burada yukarıda belirtilen parametrelere ilave olarak  $S_{mix}$  belirli yüklenme zamanı ve ısıdaki karışımın rijitliğini ifade etmektedir. Asfalt enstitüsü tarafından aşağıda belirtilen bağıntı bulunmuştur.

$$N_f = 18.4xCx(4.325x10^{-3}x\varepsilon_t^{-3.291}xS_{mix}^{-0.854} \quad (2.8)$$

C terimi aşağıdaki bağıntı yardımıyla belirlenmiştir.

$$C = 10^M$$

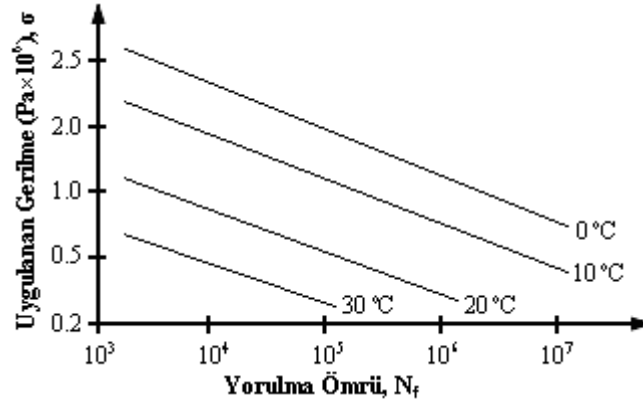
$$M = 4.84x \left[ \frac{V_B}{V_B + V_V} - 0.69 \right] \quad (2.9)$$

Burada  $V_V$ , hava boşluğu hacmini ifade etmektedir.

Bütün bu bağıntılarda asfaltın tüm özellikleri yumuşama noktasıyla veya asfalt rijitliğiyle ifade edilmektedir. Bunun yanında bu bağıntıların yalnızca bir yaklaşım olduğu göz önünde bulundurularak bu yöntemler üstyapı tasarımı ve performanslarının değerlendirilmesi amacıyla kullanılmalıdır.

Yorulma ömrü, genel olarak karışımın boşluğu azaldıkça, rijitliği ile kalınlığı ve asfalt miktarı ile yumuşaklığı arttıkça artış göstermektedir [1]. Aynı özelliklere sahip karışımların farklı sıcaklıklarda ve sabit gerilme altındaki yorulma ömürleri Şekil 2.1'de gösterilmiştir. Çizgiler esas olarak paralel olup düşük sıcaklıklarda daha uzun yorulma ömrü olduğunu göstermektedir. Deneylerin farklı frekanslarda gerçekleştirilmesi

durumunda sonuç yine benzer çıkacaktır ki bunun anlamı da yüksek frekanslarda yorulma ömrünün artmasıdır [28].



Şekil 2.1. Karışımların sıcaklık, gerilme ve yorulma ömrü ilişkisi [28]

### 2.1.5. Bitümlü Sıcak Karışımların Esnekliği (Fleksibilitesi)

Esneklik, bitümlü sıcak karışımların trafik ve çevre etkileriyle, çatlamadan eğilebilme ayrıca temel ve alttemel tabakalarının oturmalarına uyabilme yeteneğini ifade etmektedir. Bitümlü sıcak karışımların esnekliği genel olarak yüksek asfalt içeriği ve nispeten açık veya boşluklu gradasyonlar kullanılmasıyla artırılabilir. Ancak, kaplamanın esnekliğindeki artışın, stabilitesini azaltacağı da unutulmamalıdır [3, 24].

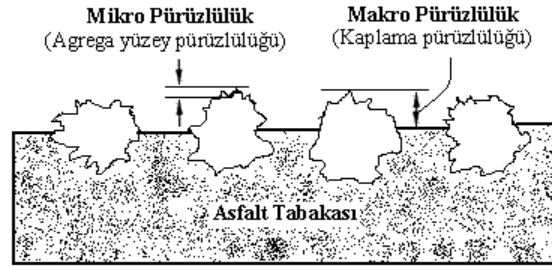
### 2.1.6. Bitümlü Sıcak Karışımların Geçirgenliği (Permeabilitesi)

Geçirgenlik, BSK kaplama yapısının içine doğru veya içinden hava ve su geçişine karşı gösterdiği direnç anlamına gelmektedir. BSK yapısındaki boşluk oranı ve boşlukların birbiri ile bağlantısı, kaplama yüzeyindeki suyun alt tabakalara geçmesi için gerekli koridorları oluşturmaktadır. Kaplamadaki geçirimsizliğin artması sonucunda bünyesine giren hava ve su etkisiyle soyulma mukavemeti azalmakta, bitümlü bağlayıcıda meydana gelen yaşlanma hızlanmakta ve donma-çözülme tekerrürleri ile kaplamada bozulmalar meydana gelmektedir. Bitümlü sıcak karışımların bitüm içeriği ve sıkışma miktarına bağlı olarak yoğunluğu arttıkça boşlukları azalacağından geçirimsizliği artacaktır. Bununla birlikte, karışımın içsel sürtünme açısının azalmasını önlemek ve kaplamanın geçirgenliğini azaltarak asfaltın yaşlanmasını geciktirmek için boşluk miktarı

sınırlandırılmaktadır [3, 24]. % 3-5 boşluk içeriğinde karışımın geçirimsiz olduğu kabul edilmektedir.

### 2.1.7. Bitümlü Sıcak Karışımların Kayma Direnci

Kayma direnci, aşınma tabakası üzerinden geçen araçların frenleme sırasında emniyetle durabilmesi ve kurplarda merkezkaç kuvvetinden dolayı savrulmaması için teker ile kaplama arasındaki gerekli sürtünme direncini ifade etmektedir. Kayma direnci genel olarak; düşük asfalt miktarı, cilalanma direnci yüksek olan kırmataş ve pürüzlü yüzeyli agrega kullanımı ile ayrıca açık ve kaba gradasyonlu karışım kullanılmasıyla artmaktadır. Bitümlü sıcak karışımlarda mikro ve makro pürüzlülük söz konusudur (Şekil 2.2). Mikro pürüzlülük agreganın yüzey yapısına bağlı iken makro pürüzlülük asfalt karışımında kullanılan agreganın nominal boyutu ile ilgilidir [1]. Pandül ayak yardımıyla kaplama yapısının kayma direnci kolaylıkla belirlenebilmektedir. Fazla bitüm kullanılması durumunda oluşabilecek kuma, kayma direncinde azalmaya neden olmaktadır.



Şekil 2.2. Agregalarda mikro ve makro pürüzlülük [1]

### 2.1.8. Bitümlü Sıcak Karışımların İşlenebilirliği

İşlenebilirlik, bitümlü sıcak karışımların karıştırılması, serilmesi ve sıkıştırılması esnasında gösterdiği kolaylığın ölçüsü olarak ifade edilmektedir. İşlenebilirlik, karışım dizayn parametrelerinde, agrega kökeni veya gradasyonunda yapılacak değişikliklerle yükseltilebilmektedir [26]. Genel olarak işlenebilirlik; kaba agrega miktarı, agrega maksimum dane boyutu, asfalt viskozluğu, agrega kırılmışlığı ve yüzey pürüzlülüğü arttıkça, kırmataş agrega kullanıldıkça, karışımın ısısı düştükçe, asfalt katılaştıkça, mineral filler miktarı ve ara boyutlu malzeme miktarı aşırı arttıkça azalmaktadır [3].

İşlenebilirliği düşük olan karışımlar, serme ve özellikle sıkıştırmada zorluklara neden olacağından, genellikle homojen olmayan ve stabilitesi düşük olan kaplamalar elde edilmektedir. Ayrıca işlenebilirliği düşük olan karışımlarda tabaka kalınlığına homojen bir sıkıştırma elde edilememekte ve özellikle yüzeyde daha az sıkışma olmaktadır. Bu durum da trafiğin etkisi ile yüzeyde çok çabuk kopmalar oluşmasına ve bunun sonucunda kaplamanın bozulmasına neden olmaktadır.

Bitümlü sıcak karışımların temel özelliklerine etki eden parametreler Tablo 2.1’de toplu halde verilmiştir.



**Tablo 2.1.** Bitümlü sıcak karışımların temel özelliklerine etki eden parametreler [3]

| Karışım Özelliği   | Bağlayıcı |     |         |         | Agrega    |          |                      |                          | Yoğunluk (Sıkışma) |    | Isı |     | Yükleme Hızı |       | Kaplama Kalınlığı |    |
|--------------------|-----------|-----|---------|---------|-----------|----------|----------------------|--------------------------|--------------------|----|-----|-----|--------------|-------|-------------------|----|
|                    | Miktar    |     | Katılık |         | Yoğunluk  |          | Agrega Tipi          |                          | Çok                | Az | Çok | Az  | Yüksek       | Düşük | Çok               | Az |
|                    | Fazla     | Az  | Katı    | Yumuşak | Çok Yoğun | Az Yoğun | Köşeli Pürüzlü Poroz | Yuvarlak Cilalı Az poroz |                    |    |     |     |              |       |                   |    |
| Stabilite          | Opt.(1)   |     | X       |         | x         |          | X                    |                          | x                  |    |     | x   | X            |       | x                 |    |
| Rijitlik           | (2)       |     | X       |         | x         |          | X                    |                          | x                  |    |     | x   | X            |       | x                 |    |
| Dayanıklılık       | x         |     | X       |         | x         |          | X                    |                          | x                  |    |     | (4) | X            |       | x                 |    |
| Yorulma Mukavemeti | x         |     |         | X       | x         |          | X                    |                          | x                  |    | (6) |     | X            |       | x                 |    |
| Esneklik           | x         |     |         | X       |           | x        |                      | x                        |                    | X  | x   |     | -            | -     |                   | x  |
| Geçirgenlik        | x         |     | X       |         | x         |          |                      | (5)                      | x                  |    |     | (7) | -            | -     | x                 |    |
| Kayma Direnci      |           | X   | X       |         |           | x        | X                    |                          | x                  |    |     | x   | -            | -     | -                 | -  |
| İşlenebilirlik     |           | (3) |         | X       |           | x        |                      | x                        | -                  | -  | x   |     | -            | -     |                   | x  |

**Notlar:**

1. Asfalt yüzdesi optimum civarında ancak, optimumdan daha az ise yüksek stabilite, aksi takdirde düşük stabilite elde edilir.
2. Asfalt katı ve ısı düşük ise fazla asfalt yüzdesinde, aksi halde az asfalt yüzdesinde oluşur.
3. Genel olarak az asfalt yüzdesinde olur.
4. Isının dayanıklılık üzerindeki etkisi; Isı çok yüksek ise soyulma, ısı çok düşük ise büzülme çatlakları artar.
5. Genel olarak geçirimsizlik yoğunluk ile artar.
6. Isının yorulma mukavemeti üzerinde direkt etkisi yoktur.
7. Düşük ısıda karışımın boşluk oranı, tasarım boşluk oranı civarındadır.

## **2.2. Bitümlü Sıcak Karışımlarda Kullanılan Malzemeler**

### **2.2.1. Bitümlü Sıcak Karışımlarda Kullanılan Agregalar**

Yol yapımının ana malzemesi olan agregaya üstyapıda ağırlıkça ve hacimce önemli bir kısmı oluşturmaktadır. Aynı zamanda agregaya, yola etkiyen yüklerin oluşturduğu gerilmelerin karşılanmasında önemli bir rol oynamaktadır [3, 29,30].

Kaba agregaya, ince agregaya ve mineral filler içeren en az üç ayrı dane gurubunun belirli oranlarda karıştırılması ile karayollarına uygun agregaya kombinasyonu elde edilmektedir [31]. Esnek üstyapılarda kullanılacak agregaların, trafiğin statik ve dinamik yüklerine karşı koyabilmesi, bitümlü iyi bir uyum sağlaması ve farklı hava şartlarına karşı koyabilme özelliğine sahip olması gerekmektedir.

#### **2.2.1.1. Agregalarda Köken Sınıflandırılması**

Agregalar elde edildikleri kaynak olarak doğal agregalar (dere malzemesi ve kırmataş) ve yapay agregalar olmak üzere iki sınıfa ayrılmaktadır. Dere malzemeleri, kum-çakıl karışımından oluşmaktadır. Yüzey özelliklerinden dolayı bitümlü sıcak karışımlarda doğrudan kullanılamayan dere malzemeleri, konkasörlerde kırılarak elde edilen kırma çakıl ve kırma kum olarak kaplama yapımında kullanılabilir. Yol kaplamalarında kullanılacak en ideal agregaya, püskürük, tortul ve metaformik olarak sınıflandırılan doğal kayaların kırılması ile elde edilen kırmataş mineral agregalarıdır [1, 32]. Yapay agregalar, genel olarak endüstriyel çalışmaların yan ürünü ya da artığıdır. Yapay agregaya olarak en sık kullanılan cürufklar, yüksek fırınların yan ürünü olup, genellikle çok gevrek ve poroz yapıya sahiptirler.

#### **2.2.1.2. Agregalarda Boyut Sınıflandırması**

Bitümlü sıcak karışımlarda kullanılan agregalar boyutlarına göre kaba, ince ve filler olarak sınıflandırılmaktadır. Kaba agregaya; kırılmış ve elenmiş, taş, çakıl veya bunların karışımından oluşan ve agregaya karışımının No. 4 (4,75 mm.) elek üzerinde kalan kısmıdır. Karayollarında kullanılan kaba agregaya; temiz, pürüzlü, sağlam ve dayanıklı malzemedir oluşmalıdır. Kaplama tabakasında kullanılacak agregalarda aranan özellikler Tablo 2.2'de görülmektedir [31].

**Tablo 2.2.** Kaba agregalarda aranan özellikler [31]

| Özellikler   | Deney metodu              | Hafif ve orta trafikli yollar |        | Ağır trafikli yollar. Otoyollar ve tırmanma şeritleri |        |
|--|---------------------------|-------------------------------|--------|---|--------|
|  |                           | Binder                        | Aşınma | Binder  | Aşınma |
| Aşınma kaybı (Los Angeles) maksimum %  | TS 3694 (ASTM C - 131)    | 35                            | 35     | 35  | 30     |
| Hava tesirlerine karşı dayanıklılık (donma deneyi, Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ile) kayıp, maks. %                                     | TS 3655 (ASTM C-88)       | 12                            | 10     | 12  | 10     |
| Kırılmışlık (en az iki yüzü) ağırlıkça, minimum %  | —                         | 60                            | 60     | 100   | 100    |
| Yassılık indeksi maksimum %  | BS 812                    | 35                            | 35     | 35  | 30     |
| Cilalanma değeri minimum   | BS 812                    | —                             | 0.50   | —   | 0.50   |
| Su absorpsiyonu maksimum, %  | TS 3526 (ASTM C - 127)    | 2.5                           | 2.5    | 2.5   | 2.0    |
| Soyulma mukavemeti min.%   | EK-A                      | 50                            | 50     | 50  | 50     |
| *Suyun sıkıştırılmış bütümlü karışımların kohezyonuna etkisi suya daldırılmış numunelerin basınç dayanımının orjinal dayanıma oranı, min.% | ASTM D-1075 (AASHO T-165) | 70                            | 70     | 70  | 70     |
|  | —                         |                               |        |   |        |

\* Bu deney ihtiyaridir.

İnce agrega, No. 4 (4,75 mm.) elekten geçip No. 200 (0,075 mm.) elek üzerinde kalan malzeme olarak tanımlanmaktadır. İnce agreganın karışımdaki ana görevi, iri agreganın oluşturduğu iskeletin boşluklarını doldurarak daha yoğun bir karışımın elde edilmesini sağlamaktır [25, 33]. Agrega karışımında kullanılan kırılmamış dere malzemesi, kırma malzeme veya cürufa nazaran daha düşük bir deformasyon direnci sağlamaktadır [25]. İnce agregalarda aranan özellikler Tablo 2.3.'te verilmiştir.

**Tablo 2.3.** İnce agregalarda aranan özellikler [31]

| Özellikler                         | Deney metodu            | Binder tabakası için        | Aşınma tabakası için |
|------------------------------------|-------------------------|-----------------------------|----------------------|
| Plastisite İndeksi Maksimum %      | TS 1900                 | 2                           | 2                    |
| Organik Madde Miktarı (Maksimum %) | TS 3673 (AASHO T - 194) | 0 - 1 (Renk Skalası) ( 0.5) | müsaade edilmeyecek  |

Mineral filler, tamamı No.30 (0,600 mm.) elekten geçip, ağırlıkça en az %70'i No.200 (0,075 mm.) elekten geçen malzeme olarak tanımlanmaktadır. Mineral filler; taş tozu, sönmüş kireç, mermer tozu, çimento, uçucu kül veya benzeri mineral maddelerden meydana gelebilir ve içerisinde kil, toprak, organik ve zararlı maddeler ihtiva etmemelidir.

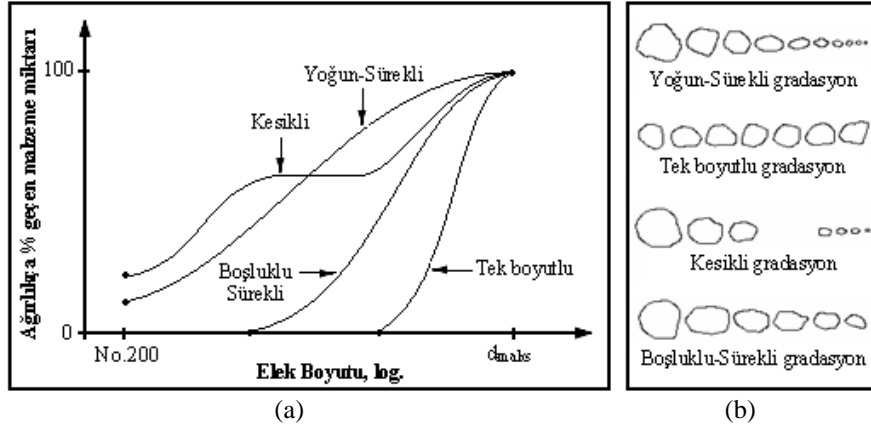
Toplam agreganın çok az bir miktarını oluşturan filler karışımın özelliklerine önemli oranda etki etmektedir. Karışımındaki boşlukları doldurmaya yardımcı olarak agrega tanecikleri arasında daha fazla temas noktası sağlayan filler malzemesi daha yoğun karışımların elde edilmesinde de rol oynamaktadır [34]. Genellikle mineral filler agreganın No.200 elekten geçen kısmı şeklinde tarif edilmesine rağmen No.200 elekten geçen her malzeme mineral filler sayılamaz. No.200 elekten geçen mineral filler gradasyonun çok iyi olması ve içinde 0.01 mm'den ince danelerin bulunması gerekmektedir. Mineral filler gradasyonu şartnameye uymazsa kaplamanın stabilitesi, birim ağırlığı ve kaplamada asfalt ile doldurulan boşlukların %'si azalacaktır.

### **2.2.1.3. Agregalarda Gradasyon Sınıflandırması**

Agrega harmanını oluşturan danelerin boyutlarına göre dağılımını ifade eden gradasyon, bitümlü sıcak karışımın stabilite ve işlenebilirliğime büyük oranda etki etmektedir. Belirli bir karışım için maksimum dane boyutu ve belirli boyuttaki danelerin ağırlıkça miktarlarının belirli limitler dâhilinde olması şartnameler ile öngörülmektedir. Maksimum dane boyutu arttıkça işlenebilirlik ve sıkışma zorlaşarak, segregasyon artmakta, boşluk miktarı ve agrega danelerinin toplam yüzeyi azalmakta, yoğunluk ve stabilite artmakta, bağlayıcı ihtiyacı azalmaktadır [1].

Farklı kalınlıkta yapılabilen asfalt kaplamalarda, farklı maksimum dane boyutları nedeniyle farklı tip gradasyonlara ihtiyaç vardır. Asfalt kaplamaların kalınlığı arttıkça kullanılacak malzemenin maksimum dane boyutu artmaktadır. Genel bir kural olarak bir defada serilip sıkıştırılacak karışım kalınlığı  $d_{max}$ 'ın 1,5 katından az 3 katından fazla olmamalıdır [3].

Agregalar gradasyon yönünden kesikli, yoğun-sürekli, boşluklu-sürekli ve tek boyutlu gradasyon olmak üzere dört farklı şekilde sınıflandırılmaktadır. Bu gradasyon tipleri Şekil 2.3'de görüldüğü gibi, elek analiz grafiğinde çizilirse kolayca ayırt edilebilir ve farklı özelliklere sahiptir.



Şekil 2.3. Agrega gradasyon tipleri (a) ve görsel dağılımı (b) [1]

Yoğun-sürekli gradasyonda, en kaba malzemeden en ince malzemeye kadar olan agrega boyutları uygun oranlarda olduğundan karışımın boşluk muhtevası düşük buna bağlı olarak da yoğunluğu artmış durumdadır. Bu nedenle, sıcak karışımlarda kullanılacak agregaların, yoğun-sürekli gradasyona sahip olması istenmektedir [3]. Kesikli gradasyona sahip agregalar, belirli aralıktaki dane çaplarını içermediklerinden boşluk miktarları fazla olmaktadır ve bu nedenle yol inşaatında kullanılmamaktadır. Boşluklu-sürekli gradasyon, ince malzeme ihtiva etmediğinden boşluk oranı yüksektir ve sıcak karışımlarda kullanılmazlar. Yine tek boyutlu gradasyon da hemen hemen aynı boyuttaki agregalar ihtiva ettiklerinden düşük standartlı yol kaplamalarında kullanılmaktadır.

#### 2.2.1.4. Agregaların Biçim, Yüzey Dokusu ve Porozite Sınıflandırılması

Agrega danelerinin biçimleri, yol kaplamalarında kullanılan karışımların sıkışma direncine, işlenebilirliğine, yoğunluğuna, stabilitesine, içsel sürtünme açısına ve kayma mukavemetine etki etmektedir. Yuvarlak agregalar köşeli agregalara göre işlenebilirlik yönünden daha üstün iken köşeli agregalar deformasyona karşı direnç yönünden daha üstün durumdadır [3].

Agregaların yüzey yapısı; danelerin pürüzlülük veya cilalılık durumunu ifade etmektedir. Pürüzlü yüzey dokusuna sahip agregalar, bağlayıcı ile iyi bir şekilde kenetlenerek güçlü bir bağ ile iyi bir karışım oluşturabilmektedir. Eğer agrega danelerinin yüzey pürüzlülüğü fazla ise karışımın işlenebilirliği azalmakta ancak içsel sürtünme açısı, stabilite, kayma direnci ve asfalt ile adezyon kuvveti artmaktadır. Ancak buna karşın karışımın boşluk hacmi ve sıkışmaya karşı direnci gibi olumsuz özellikleri de artmaktadır [3, 35].

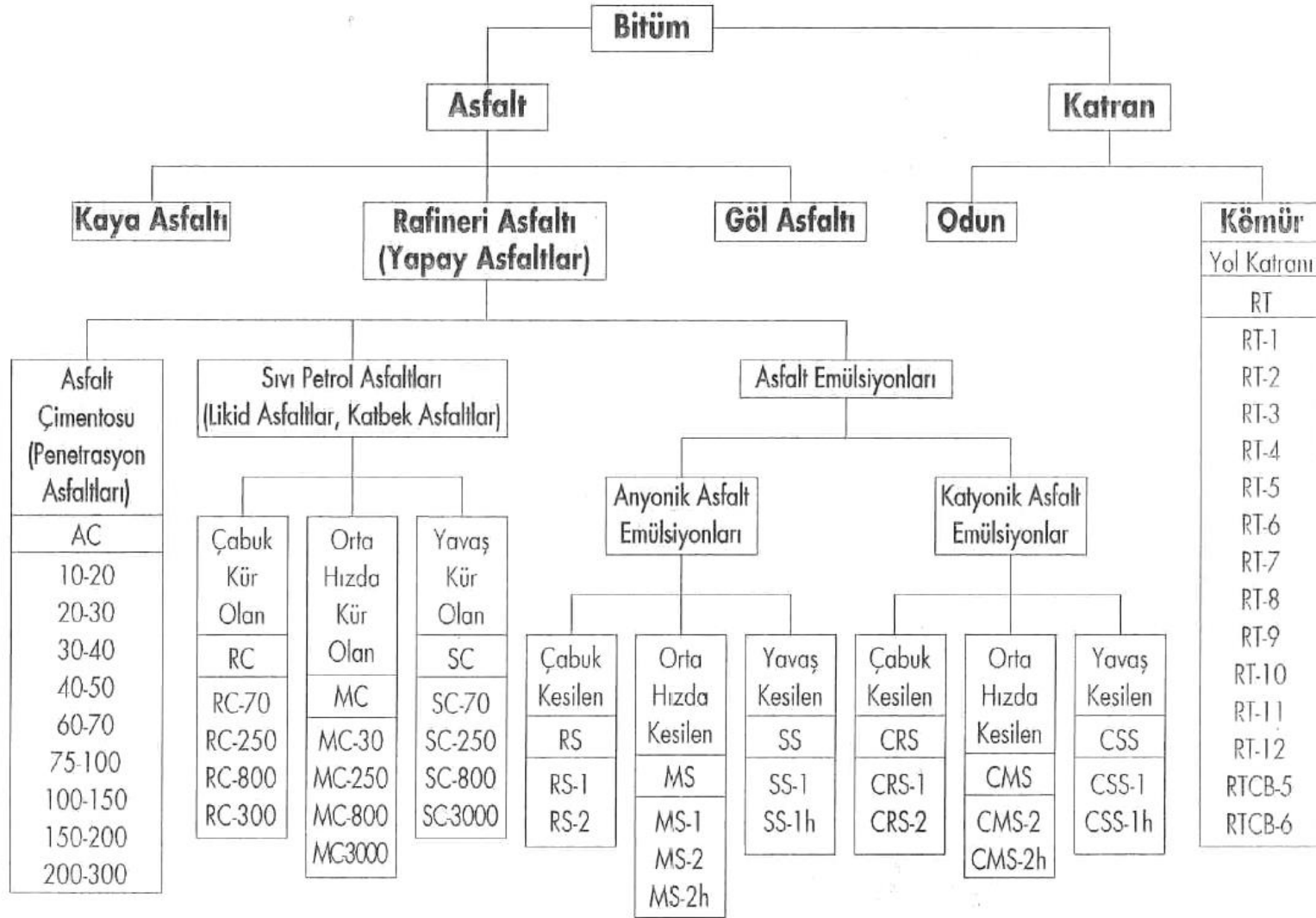
Agrega danelerinin porozitesinin (veya su emme yeteneğine sahip boşluk miktarının) belli bir düzeyde olması istenmektedir. Yeterli poroziteye sahip agregada daneleri asfaltın emilmesine imkan vereceğinden agregalar ile bitümlü bağlayıcı arasında güçlü bir adezyon sağlayacak ve stabilitenin artmasına, nem hasarının ise azalmasına neden olacaktır. Ancak aşırı poroz agregalarda özgül ağırlık düşük olacağından kütleli stabilite de düşük olmaktadır. Ayrıca bu durumda fazla bitüme ihtiyaç duyulduğundan sıcak havalarda kasma problemiyle karşı karşıya kalınabilmektedir.

### **2.2.2. Bitümlü Sıcak Karışımlarda Kullanılan Bitümlü Bağlayıcılar**

Bitüm, temel olarak hidrokarbonlardan oluşan, trikloretilen içerisinde çözülebilen, uçucu olmayan ve ısıtıldığında gittikçe yumuşayan, viskoz bir sıvı veya katı bir madde olarak tanımlanmaktadır. Bitüm, petrolün rafinaj işlemi sırasında elde edilebildiği gibi doğal bir birikinti olarak (Trinidad gölü) veya içerisinde mineral maddelerle birlikte doğal bir şekilde ortaya çıkmış asfaltın bir bileşiği olarak da bulunabilmektedir [36]. Bitümlü malzemelerin sınıflandırılması Şekil 2.4'te verilmiştir.

Ülkemizde yol esnek üstyapılarında bitümlü bağlayıcı olarak; asfalt çimentoları, katbek asfaltlar, asfalt emülsiyonları ve katranlar kullanılmaktadır. Katran, başta kömürün ve odunun kapalı bir sistem içerisinde kuru olarak damıtılmasından elde edilmektedir. Bu şekilde elde edilen katrana ham katran denilmektedir. Kömür kökenli katranlar yol kaplamalarında bağlayıcı olarak tercih edilmektedir [37]. Asfalt emülsiyonları, su ile asfalt çimentosu küreciklerinin karışımı olduğundan heterojen ve iki fazlı bir malzemedir. Asfalt çimentosunun çok küçük partiküller (0,1–0,5 mikron) halinde parçalanıp suda koloidal şekilde dağıtılması sonucu akıcı hale getirilmesi ile emülsiyonlar elde edilmektedir. Sprey şeklinde yola tatbikinden sonra drenaj ve buharlaşma ile su, emülsiyondan ayrılarak asfalt çimentosu orijinal haline dönmektedir. Katbek asfaltlar, asfalt çimentosuna benzin gazyağı veya madeni yağ gibi çözücüler ilave edilerek elde edilen sıvı haldeki bitümlü bağlayıcılardır [38]. Katbek asfaltlar kür (geri kesilme) süresine göre üç gruba ayrılmakta ve çözücü miktarına göre de kıvamları ayarlanmaktadır. Uygulandıktan sonra çözücülerin buharlaşması sonucu asfalt çimentosu kendi özelliklerine geri dönmektedir.

Asfaltlar doğal asfaltlar ve yapay asfaltlar diye iki gruba ayrılabilir. Doğal asfaltlar, mineral maddelerle karışmış halde bulunan kaya ve göl asfaltlarıdır. Yapay asfaltlar ise, ham petrolün arıtılmasından elde edilmektedir.



Şekil 2.4. Bitümlü malzemelerin sınıflandırılması [27]

### 2.2.2.1. Doğal Asfaltlar

Doğal asfaltlar doğada genellikle mineral maddelerle karışmış halde bulunmaktadır. Konumlarına göre göl ve kaya asfaltı olarak adlandırılmaktadır ve genellikle bitümlü sıcak karışımlarda katkı maddesi olarak kullanılmaktadır. En sık kullanılan doğal asfalt katkı maddeleri Trinidad Göl Asfaltı (TLA) ve gilsonittir. 1876 yılında yapılan ilk bitümlü sıcak karışım uygulamasında bağlayıcı olarak kullanılan TLA [38, 39], Trinidad & Tobago’da bulunan La Brea bölgesinden çıkarılmaktadır. Genel olarak TLA bitüm ve mineral maddeden oluşmaktadır. TLA’nın bitüm kısmı maltenlerden (63–66%) ve asfalttenlerden (34–37%) oluşmaktadır. Tipik olarak, rafine TLA’nın yumuşama noktası 93 ve 99°C arasında ve 25°C sıcaklıktaki penetrasyon değeri 2 mm<sup>-1</sup> dir [40]. Rezervi 10-15 milyon tondur. Rafine edildikten sonra yaklaşık % 55 asfalt içermektedir. Dünyada bundan başka göl asfaltları da bulunmaktadır.

Gilsonit, bitümün fiziksel ve kimyasal özelliklerini iyileştirme potansiyeline sahip, doğal olarak oluşan bir katı hidrokarbon mineralidir [41]. Gilsonit, kolay kullanımı ve asfaltla iyi uyumuyla bilinmektedir. Gilsonit, doğada bulunan bir çeşit asfalt bağlayıcı olması dolayısıyla bitüm içinde hızlı bir şekilde çözülebilmektedir [42]. Amerika’nın Utah eyaletinde ve İran’da önemli gilsonit kaynakları bulunmaktadır.

### 2.2.2.2. Rafineri Asfaltları

Bitümlü sıcak karışımda ve sathi kaplamalarda kullanılmak üzere hazırlanmış petrol kökenli bitümlerdir. Bitümler genellikle penetrasyon değerlerine göre sınıflandırılmaktadır. Amerika’da viskoziteye, Superpave sisteminde ise performans seviyesine göre sınıflandırılmaktadır. Değişik penetrasyon dereceleri, petrolün arıtılması sırasındaki işlemlerle sağlanmaktadır. Ülkemizdeki dört farklı rafineride karayolu üstyapılarında kullanılan 4 farklı sınıf (B 50/70, B 70/100, B 100/150 ve B 160/220) bitüm TS 1081 EN 12591 standardına uygun özelliklere sahip olacak şekilde üretilmektedir. Bitümlü bağlayıcılar arasında düşük kıvamlı asfalt çimentolarının soğuk iklimli bölgelerde, yüksek kıvamlı bitümlerin ise sıcak iklimli bölgelerde kullanılması tavsiye edilmektedir [43]. Türkiye’nin sıcaklık dağılımına göre kullanılacak bitüm sınıfları Tablo 2.4’te verilmiştir.



**Tablo 2.4.** Türkiye’de üretilen bitümler ve kullanıldıkları bölgeler [27]

| Bitüm sınıfı       |                    | Bitümün kullanılacağı yerler   |
|--------------------|--------------------|--|
| BSK için           | Sathi kaplama için |  |
| B 40/60<br>B 50/70 | B 70/100           | Akdeniz ikliminin hüküm sürdüğü kesimler ve Güney Doğu Anadolu’nun güney kesimleri                                       |
| B 50/70            | B 100/150          | Karadeniz, Marmara, iç Anadolu, iç Batı Anadolu, Güney Doğu Anadolu'nun Kuzey kesimleri, Doğu Anadolu'nun Batı kesimleri |
| B 70/100           | B 100/150          | Yukarıda belirtilen bölgelerin çok soğuk kesimleri ile Doğu Anadolu'nun soğuk ve yüksek kesimleri                        |

Ayrıca, bitümler, sıvı petrol asfaltlarının (katbek asfalt) ve bitüm emülsiyonlarının hazırlanmasında da kullanılır.

#### **2.2.2.3. Sıvı Petrol Asfaltları**

Sıvı petrol asfaltları, ısıtılmış bitümlere (B 70/100, B 100/150 gibi) benzin, gazyağı ya da bakiye yağ karıştırılması ile üretilmektedir. Asfalt çimentosuna;

- Benzin ilavesi ile çabuk kür olan (RC) sıvı petrol asfaltları
- Gazyağı ilavesi ile orta hızda kür olan (MC) sıvı petrol asfaltları
- Bakiye yağ ilavesi ile yavaş kür olan (SC) sıvı petrol asfaltları elde edilmektedir.

Kullanılan bitümün sınıfı ve oranı ile çözücü miktarına göre, değişik sınıflarda sıvı petrol asfaltı tipleri hazırlanmaktadır. Aşağıdaki tablolarda sıvı petrol asfaltları tipleri verilmiştir. Sıvı petrol asfaltlarından MC-30 ve MC-70 astar tabakasında, MC-800 ve RC-800 ise soğuk karışımlarda kullanılmaktadır.

#### **2.2.2.4. Bitüm Emülsiyonları**

Geniş anlamda, emülsiyon, normal koşullarda birbiri içerisinde çözünmeyen ve karışmayan, iki ayrı faz halinde kalan sıvıların, bazı kimyevi maddeler aracılığı (emülgatör) ile tek faz halinde, dağıtılan fazın (asfalt), dağıtan faz (su) içinde mikron mertebesinde, homojen bir şekilde dağıtılmasıdır. Bitüm emülsiyonları da bitüm küreciklerinin su içinde dağıtılmasından oluşmaktadır. Ancak, bitümün su içerisinde dağıtılması ile oluşturulan emülsiyonda kısa süre sonra asfalt kürecikleri birbirine

yapılarak sudan ayrılacağından emülsiyon uzun ömürlü olmaz. Bu durumu önlemek amacıyla, emülgatör (emülsiyon verici madde) kullanılarak, asfalt kürecikleri çevresinde emülgatör filmi oluşturulur ve bu şekilde kendi aralarında birleşmeleri önlenir. Yol üstyapılarında kullanılan asfalt emülsiyonları emülgatör cinsine bağlı olarak anyonik ve katyonik bitüm emülsiyonları olmak üzere iki sınıfa ayrılmaktadır.

Bitüm emülsiyonu, agrega ile karıştırıldığında ya da yolun yüzeyine püskürtüldüğünde kesilmektedir ki bu da asfalt küreciklerinin sıvı ortamdan ayrılarak agregaların üzerine yapışması anlamına gelmektedir. Bu arada serbest kalan su da buharlaşmaktadır. Yol üstyapılarında kullanılan asfalt emülsiyonlarının kullanım yerleri aşağıdaki tablolarda verilmektedir.

**Tablo 2.5.** Bitüm emülsiyonlarının kullanım yerleri [27]

|                        |                        |
|------------------------|------------------------|
| Astar tabakasında      | SS-1,SS-1h,CSS-1,CSS-2 |
| Yapıştırma tabakasında | RS-1,RS-2,CRS-1,CRS-2  |
| Sathi kaplamada        | RS-1, CRS-1,CRS-2      |
| Soğuk karışımda        | MS-2,SS-1              |

Yol yapımında kullanılan bitümlü malzemelerin uygulama sıcaklıkları ise aşağıdaki tabloda verilmektedir.

**Tablo 2.6.** Bitümlerin kullanım sıcaklıkları [27]

| Bitümlü Asfaltın tipi ve sınıfı | Sıcaklık Aralığı<br>minimum-maksimum,°C |                         |
|---------------------------------|---|-------------------------|
|                                 | Püskürtme Sıcaklıkları                  | Karıştırma Sıcaklıkları |
| Sıvı Petrol Asfaltları          |   |                         |
| MC-30                           | 30-                                     | -                       |
| RC, MC-70                       | 50-                                     | -                       |
| RC, MC-250                      | 75-                                     | 60–80                   |
| RC, MC-800                      | 95-                                     | 75–100                  |
| RC, MC-3000                     | 110-                                    | 80–115                  |
| Asfalt emülsiyonları            |   |                         |
| RS-1                            | 20–60                                   | -                       |
| RS-2                            | 50–85                                   | -                       |
| MS-1                            | 20–70                                   | 20–70                   |
| MS-2                            | -                                       | 20–70                   |

**Tablo 2.6.** Bitümlerin kullanım sıcaklıkları (Devamı) [27]

| Bitümlü Asfaltın tipi ve sınıfı | Sıcaklık Aralığı<br>minimum-maksimum, °C |                         |
|---------------------------------|--|-------------------------|
|                                 | Püskürtme Sıcaklıkları                   | Karıştırma Sıcaklıkları |
| Asfalt emülsiyonları            |  |                         |
| SS-1,1h,CSS-1,1h                | 20–70 <sup>(4)</sup>                     | 20–70                   |
| CRS-1                           | 50–85                                    | -                       |
| CRS-2                           | 60–85                                    | -                       |
| CMS-2,CMS-2h                    | 40–70                                    | 50–60                   |
| Bitümler                        |  |                         |
| Tüm sınıflar                    | Maks. 180                                | Maks. 180               |

### 2.3. Bitümlü Sıcak Karışımlarda Oluşan Bozulmalar

Karayolu esnek üstyapılarında iklim, çevre ve trafik koşulları nedeniyle bozulmalar meydana gelmektedir. Yol üstyapılarında meydana gelen bozulmalar başlıca tasarım, yapım ve bakım hatalarından, uygun malzeme kullanılmamasından, iklim koşullarının ağırlığı ve aşırı dingil yüklerinden kaynaklanmaktadır. Esnek üstyapılarda tasarım, standart tek dingil yükü 8.2 ton ( $T_{8,2}$ ) tekrar sayısı temel alınarak yapılmaktadır. Trafikte görebileceğimiz diğer taşıtların ağırlığı standart tek dingil yüküne çevrilerek tasarımda dikkate alınmaktadır. Kaplamalara asıl zararı tek, tandem ve tridem dingile sahip ağır taşıtlar vermektedir. (Şekil 2.5).



Şekil 2.5. Tek, tandem ve tridem dingile sahip ağır taşıtlara örnekler

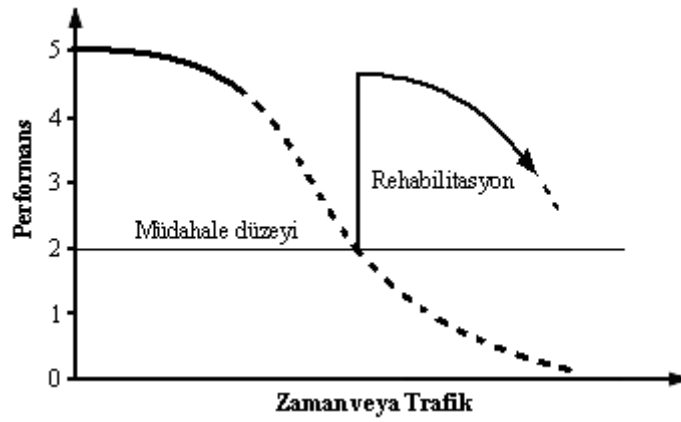
Kaplamaların erken bozulmasına neden olan diğer bir faktör de dingil sayısına göre taşınmasına müsaade edilen ağırlıkların göz ardı edilmesidir. Farklı dingil yüklerinin standart dingil yüküne göre esnek üstyapıya verdiği zarar miktarı “araç zarar faktörü” veya “eşdeğerlik faktörü” olarak adlandırılmaktadır. Taşıt eşdeğerlik faktörü aşağıdaki (2.10) bağıntısı ile hesaplanmaktadır [44].

$$TEF = \sum_{i=1}^n \left( \frac{P_i}{8.2} \right)^\alpha \quad (2.10)$$

Burada  $TEF$ , taşıt eşdeğerlik faktörünü,  $P_i$  dingil yükünü,  $i$  taşıtın dingil sayısını göstermektedir.  $\alpha$ , yol üstyapısının servis yeteneğine göre değişen bir katsayı olup ülkemiz koşulları için 4,4 olarak alınmaktadır. Bu bağıntıya göre, 13 ton tek dingil ağırlığına sahip bir aracın kaplamadan bir defa geçişi, tek dingil ağırlığı 8,2 ton olan taşıtın yaklaşık 6 defa geçmesine eşit etkiyi oluşturmaktadır. Bu nedenle sürücülerin bilinçlendirilmesi ve trafikte tonaj kontrollerinin artması kaplamalarda oluşan erken bozulmalarının önlenmesinde yararlı olacaktır.

Kaplamalarda servis ömrünü uzatmanın diğer bir yolu da zamanında bakım yapılmasıdır. İklim, çevre ve trafik koşulları altında zamanla kaplamalarda bozulmalar

başlamakta ve periyodik bakıma ihtiyaç duyulmaktadır. Esnek üstyapıların performansı, servis kabiliyeti değeri ile ifade edilmektedir. Bir üstyapının belirli bir gözlem anında yüksek hız ve hacimdeki taşıt trafiğine hizmet edebilme yeteneği servis kabiliyetidir. Bu değer iyiden kötüye doğru 5 ile 0 arasında değişmektedir. Bir karayolunun son servis yeteneği indeksi, o üstyapının daha fazla hizmet veremeyeceği anlamına gelmektedir ve yolun önemine göre 2 ile 3 arasında değişmektedir. Gerekli zamanlarda bakım yapılması, bir yolun hizmet ömrünü uzatmanın bir yoludur [44]. Şekil 2.6'da bir üstyapıya gerekli zamanlarda bakım yapılması durumunda servis ömrünün değişimi görülmektedir.



Şekil 2.6. Üstyapı performans eğrisi ve rehabilitasyon gösterimi [44-46]

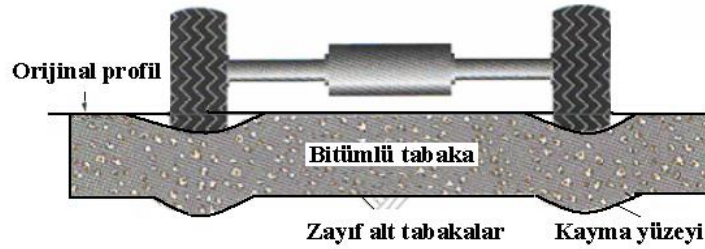
Asfalt kaplamalarda en fazla karşılaşılan bozulmalar tekerlek izi oluşumu, yorulma çatlakları, düşük sıcaklık çatlakları ve sudan kaynaklanan bozulmalardır [3, 47].

### 2.3.1. Tekerlek İzi Oluşumu

Esnek yol üstyapılarında görülen önemli bozulma türlerinden biri olan tekerlek izi oluşumu (oluklanma), taşıt tekerleklerinin yola değdiği bölümlerde, yol boyunca oluşan düşey kalıcı deformasyonlar olarak tanımlanmaktadır. Bitümlü sıcak karışım kaplamalardaki tekerlek izi derinliği, yük tekrar sayısıyla artmaktadır. Genellikle araç tekerleklerinin yola değdiği bölümlerde boyuna yönde çökmeler, kenarlarda ise küçük miktarlarda yükselmeler şeklinde görülmektedir. Tekerlek izi oluşumundaki iki ana faktör; yoğunlaşma (sıkışma, hacimde azalma) ve kayma deformasyonudur. Yapılan çeşitli çalışmalar tekerlek izi oluşumunda kayma deformasyonunun yoğunlaşmaya göre daha etkin

olduğunu ispatlamaktadır. Farklı nedenlere bağlı olarak dört çeşit tekerlek izi oluşum şekli vardır. Bunlar; yapısal, akma, aşınma ve oturma (konsolidasyon-sıkışma) tekerlek izidir.

Bitümlü tabakanın altındaki (taban zemini dahil) bir veya daha fazla tabakanın kendi içlerindeki deformasyonlarının sonucu olan yapısal tekerlek izinin nedeni, yükten dolayı oluşan gerilmelerin malzeme dayanımını aşmasıdır. Bu durumda, tekerlek izinin etrafında kabarmalar oluşmaz (Şekil 2.7.). Bu tip tekerlek izi oluşumu genellikle asıl trafik koşullarına uygun tasarlanmamış üstyapılarda görülmektedir. Aynı zamanda uygun olmayan (düşük kaliteli) malzemenin kullanılmasından, malzemenin iyi sıkıştırılmamasından, kötü drenajdan, donma ve çözülme etkilerine karşı önlem alınmamasından da kaynaklanabilmektedir [48-50].



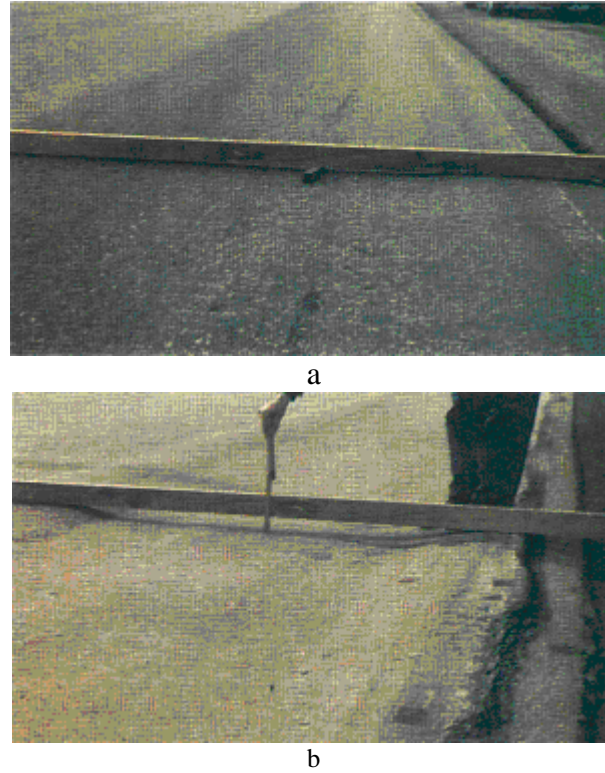
Şekil 2.7. Yapısal tekerlek izi [48-50]

Akma tekerlek izi, bitümlü tabaka veya tabakaların kendi içlerinde oluşan deformasyonlar sonucu meydana gelmektedir. Akma tekerlek izleri, yükten dolayı oluşan gerilmelerin bitümlü malzemenin dayanımını aşması sonucu oluşmaktadır. Tekerlek izi etrafında kabarmalar da oluşmaktadır (Şekil 2.8.). Akma tekerlek izi, en çok, çıkış eğimli kesimlerde, kavşak yaklaşımlarında ve kurbalarda, yani ağır taşıtların hızlarını azalttığı kesimlerde ve lastik ile kaplama arasındaki değme alanında ortaya çıkan teğetsel gerilmelerin yüksek olduğu kesimlerde oluşmaktadır (Şekil 2.8.). Bu tip tekerlek izi oluşumunda etkili faktörler, bitümlü karışımdaki bileşenlerin özellikleri ve karışım oranlarıdır [51, 52].



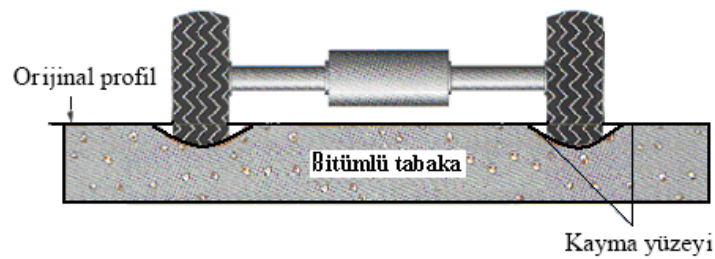
Şekil 2.8. Akma tekerlek izi [51, 52]

Hafif ve şiddetli akma tekerlek izi oluşumuna örnek Şekil 2.9.'da verilmiştir [53].



Şekil 2.9. Hafif (a) ve yüksek (b) şiddette tekerlek izi oluşumu [53]

Yüzeysel tekerlek izi tiplerinden olan aşınma tekerlek izi, kışın çivili tekerleklerin kullanılmasından dolayı, yüzeydeki agregaların aşınması nedeniyle oluşmaktadır (Şekil 2.10). Bu tip tekerlek izi özellikle çivili tekerleklerin çok kullanıldığı Kuzey Avrupa ülkelerinde görülmektedir ve bu tipte parametre olarak agrega sertliği göz önüne alınmaktadır [48].



Şekil 2.10. Aşınma ve oturma tekerlek izi [48]

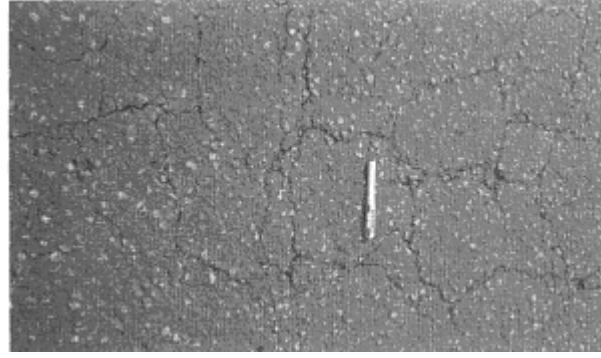
Dördüncü tip, oturma nedeniyle oluşan tekerlek izidir. Bu da yüzeysel tekerlek izi sınıfına girmektedir. Aşınma tekerlek iziyle aynı şekle sahip olan bu tip kaplama yapımı

sırasındaki sıkıştırmanın yetersizliği nedeniyle oluşmaktadır (Şekil 2.10). Yetersiz sıkıştırılmış bir karışım, özellikle sıcak havalarda, duran veya yavaş hareket eden trafiğin mevcut olduğu kavşaklarda, trafik etkisiyle oturmaya eğilimlidir. Bu tip tekerlek izinde kenarlarda kabarma oluşmaz [48].

### **2.3.2. Yorulma Çatlakları (Timsah Sırtı Çatlaklar)**

Yorulma çatlakları, tekrarlı ağır tekerlek yüklerden dolayı oluşmaktadır. Yorulma çatlakları, üstyapı eksenine paralel olup, uzunlukları birkaç desimetre ile onlarca metre arasında değişen ince çatlaklar biçiminde başlayarak, zamanla tekrarlanmak suretiyle küçük bloklar serisi şeklinde, birbirine bağlı timsah sırtı çatlaklara dönüşen çatlaklardır. Yorulma çatlakları ağır trafik yüklerinin belirli bir tekerrürü sonucu kaplamanın yorulma mukavemetinin aşılması ile oluşmaktadır [54-56]. Ayrıca; taban zemini, alttemel ve/veya temel tabakalarının yetersiz sıkışması ve/veya yetersiz drenajı nedeni ile taşıma gücü yetersizliği, uygun olmayan malzeme kullanımı ve kötü yapım teknikleri, çevre ve iklim şartları (donma etkisi, nem değişiklikleri, vs.) gibi etkiler altında, ağır taşıtların tekerlek yörüngesinde meydana gelmekte ve kaplamanın yorulma mukavemetine ve ağır taşıt trafik hacmine bağlı olarak Şekil 2.11’de görüldüğü gibi düşük, orta veya yüksek şiddette olabilmektedir

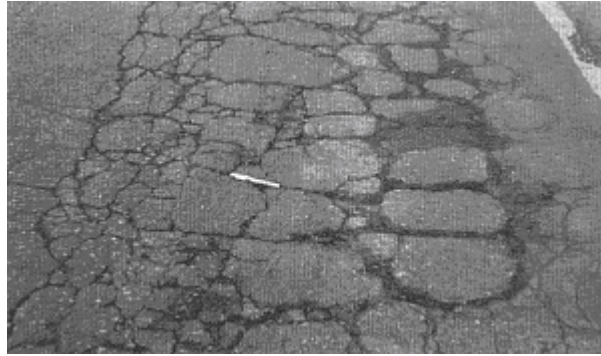




a



b



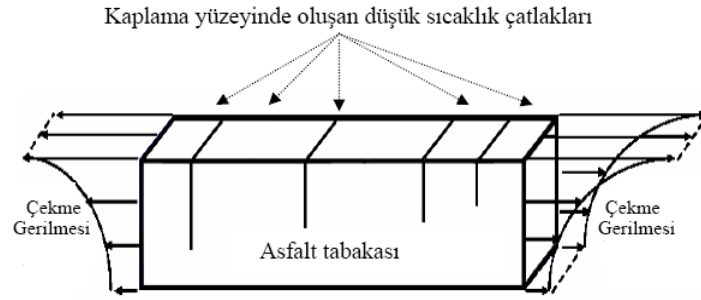
c

**Şekil 2.11.** Hafif (a), orta (b) ve yüksek (c) şiddette yorulma çatlakları [53]

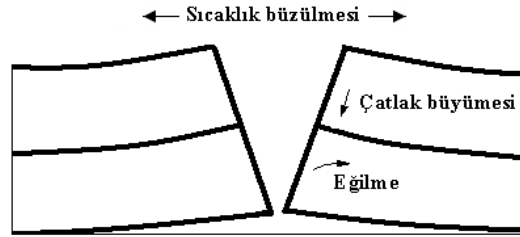
### 2.3.3. Düşük Sıcaklık Çatlakları

Termal çatlaklar, trafiğin etkilerinden çok, soğuk iklimli havalarda asfalt kaplamanın büzülmesi sonucu kaplamada artan çekme gerilmelerinin oluşturduğu, trafik akışına dik olarak meydana gelen enine doğrultudaki çatlaklardır. Kaplamalarda sıcaklık değişiminin tekrarlanması sonucu nedeniyle oluşan çatlaklar termal yorulma çatlakları olarak adlandırılırken, kaplamalarda aniden soğuma sonucu oluşan çatlaklar ise düşük sıcaklık çatlakları olarak isimlendirilmektedir [57]. Düşük ısı çatlakları, kaplamanın enine büzülmesi boyuna büzülmesinden daha kolay olduğu için genellikle 6–9 metre aralıklarla

enine düzlemde oluşmaktadır. Kış şartlarında büzölmeye çalışan kaplama yüzeyinde büyük çekme gerilmeleri oluşarak bu tekrarlı çekme gerilmeleri, kaplamanın çekme mukavemetini aştığında, Şekil 2.12’de göröldüğü gibi yüzeyde çatlaklar meydana gelmektedir. Bu düşük sıcaklık çatlakları, ağır dingil yükleri nedeniyle ortaya çıkan gerilmelerle birlikte Şekil 2.13’te olduğu gibi yüzeyden başlayıp alta doğru derinleşerek inen yapısal bozulmalara neden olmaktadır [3, 28, 51].



Şekil 2.12. Kaplama gerilme durumu ve düşük sıcaklık çatlakları [3]

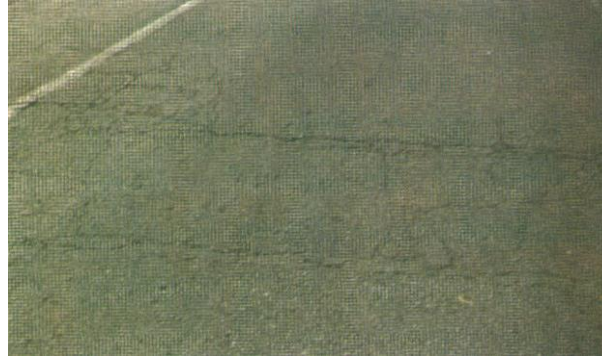


Şekil 2.13. Düşük sıcaklık çatlağının büyümesi [3]

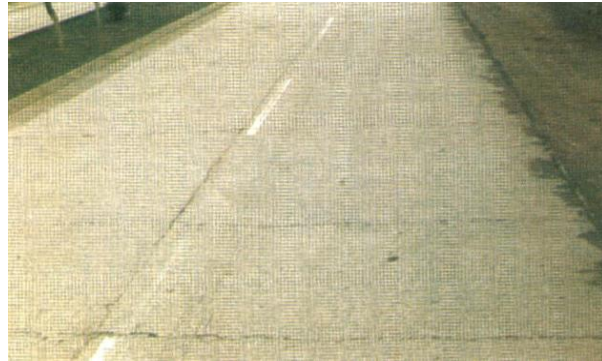
Bu çatlakların en önemli nedeni asfaltın kıvamı ve sıcaklığa olan duyarlılığıdır. Düşük sıcaklıklarda rijit bir davranış gösteren asfalt, çekme gerilmesi altında deformasyon göstermeden kırılma gösterebilmektedir. Bu nedenle soğuk bölgelerde yumuşak ve sıcaklığa az duyarlı asfalt kullanmak bu tür çatlakların azalmasını sağlayabilir. Ayrıca, karışımda kullanılacak asfalt miktarı, asfaltın yaşlanması, karışımın rijitliği, hava sıcaklığı ve çok soğuk gün sayıları, kaplama kalınlığı ve tabakalar arasındaki sürtünme kuvvetlerini de dikkate almak gerekmektedir [3, 28, 51]. Hafif, orta ve şiddetli düşük ısı çatlaklarına örnek Şekil 2.14’te verilmiştir.



a



b



c

Şekil 2.14. Hafif (a), orta (b) ve yüksek (c) şiddette düşük ısı çatlakları [53]

#### 2.3.4. Sudan Kaynaklanan Bozulmalar

Bitümlü sıcak karışımlar da sudan kaynaklanan bozulmalar üç sınıfa ayrılabilir. Bunlardan birincisi agrega daneleri ile bağlayıcı arasındaki bağın azalmasına bağlı (adezif) bozulmalar, ikincisi bağlayıcı kohezyonun azalmasına bağlı bozulmalar ve üçüncüsü donma gibi çevresel etkiler nedeni ile agrega danelerinin kırılmasına bağlı bozulmalardır. Adezif bozulmalar, bağlayıcının agrega danelerine yapışabilme özelliğini kaybedip, dane yüzeyinden ayrılması sonucu; kohezif bozulmalar ise, kütle halinde bulunan bağlayıcı

filminin dışarıdan gelen etkiler nedeniyle kaybolarak ince film halinde kopması sonucu oluşmaktadır [55].

En sık görülen nem hasarı olan soyulma, agregaya ile asfalt bağlayıcı arasındaki adezyon bağının zayıflamasından dolayı bitümlü sıcak karışımların zamanla yapısının bozulması olarak tarif edilmektedir. Soyulma genellikle asfalt kaplamanın alt tabakalarından başlayıp yukarı doğru hareket eder ve agregaya danelerini saran ince asfalt filminin su, kil ve trafiğin mekanik etkisiyle agregadan ayrılması ve dolayısıyla agregaya danelerinin çıplak kalması olayı olarak tarif edilebilir. Soyulmada rol alan önemli faktörler, agregaya ve bağlayıcının fiziksel ve kimyasal özellikleri, aralarındaki etkileşimi, üstyapı tasarımı, karışım tasarımı, serim ve sıkıştırma, yüzey ve alt tabakalardaki drenaj ve trafik olarak sıralanabilmektedir. Bu tür bozulmalarda en önemli faktör, agregaya ve asfalt ara yüzeyinde su ve nemin olmasıdır. Kuru ve temiz agregaya kullanımı, iyi bağlayıcılık karakteri olan bitüm, yüksek bitüm oranı ve yüksek viskoziteli bitüm kullanımı gibi faktörler soyulmayı azaltmaktadır.

### **3. BITÜMLÜ SICAK KARIŞIMLARDA KATKI KULLANIMI**

Asfalt katkı maddeleri, yol yapım endüstrisinde 1950'lerden beri kullanılmaktadır. Katkı kullanımı ile bitümlü sıcak karışımlarda trafik, iklim ve çevre şartları nedeniyle zamanla oluşan kalıcı deformasyonların, yorulma çatlaklarının, düşük sıcaklık çatlakları ve su etkisiyle soyulmanın engellenmesi veya geciktirilmesi amaçlanmaktadır. Katkı maddeleri bitüme ilave edilebildiği gibi karışıma da ilave edilebilmektedir. Birinci durumda bitüm modifiye edilirken ikincisinde karışım modifiye edilmektedir.

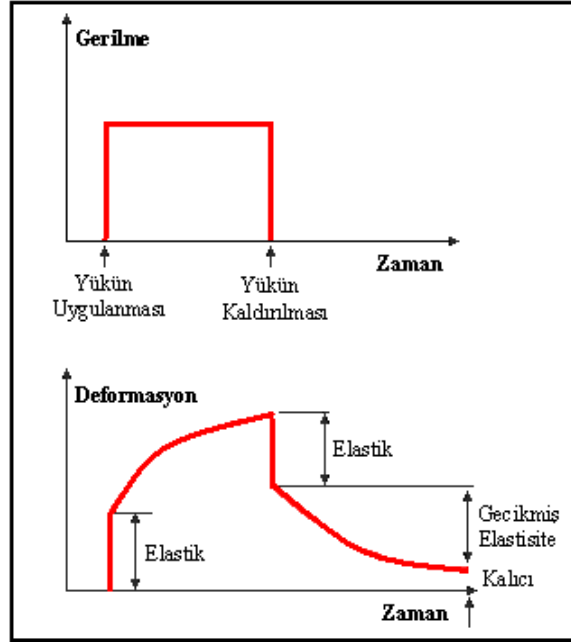
Günümüzde bitümlü bağlayıcı veya karışımların modifikasyonu için çok çeşitli katkı maddeleri kullanılmaktadır. Özellikle 1970'li yıllardan sonra yapılan birçok araştırmada bitüme, bazı katkı maddelerinin eklenmesinin; bitümün reolojik davranışını iyileştirerek bitümlü karışımların performansını arttırdığı ortaya konmuştur [58, 59].

#### **3.1. Katkı Maddelerinin Bitümlü Karışımların Özelliklerine Etkileri**

Bitümün reolojik yapı olarak visko-elastik özellik göstermesi başta çatlama karşı direnç ve kalıcı deformasyon olmak üzere kaplama performansının birçok parametresine etki ederek asfalt karışımların da visko-elastik özellik göstermelerine neden olmaktadır.

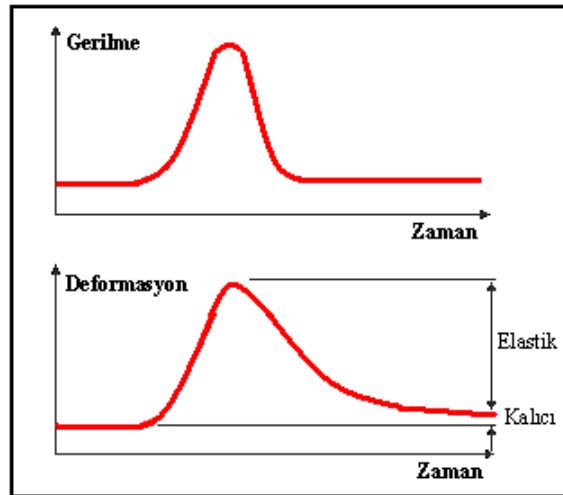
Bitümlü bir malzemede oluşan deformasyon miktarı genellikle yükleme süresine ve sıcaklığa bağlı olarak değişmektedir [11, 60]. Bitümlü bir malzemeye uygulanan yük sonucunda oluşan gerilme ve deformasyonların zamanla değişimi Şekil 3.1 ve Şekil 3.2'de görülmektedir.

Şekil 3.1; statik yüklere karşı bitümlü bir malzemenin tepkisini göstermektedir. Yük uygulanmasıyla birlikte meydana gelen şekil değiştirme, anlık bir elastik tepki şeklinde olmakta ve yük ortadan kaldırılana kadar kademeli olarak artmaktadır. Deformasyonda zamana bağlı olarak meydana gelen bu değişim malzemenin viskoz özelliğinden kaynaklanmaktadır. Yükün kaldırılmasıyla birlikte elastik deformasyon ani olarak geri dönmekte ve zaman geçtikçe de bir miktar daha toparlanma veya geri dönüşüm meydana gelmektedir. Bu durum "gecikmiş elastisite" olarak adlandırılmaktadır. Sonuç olarak; geri kazanılamayan ve doğrudan malzemenin viskoz davranışının sebep olduğu bir miktar kalıcı deformasyon meydana gelmektedir.



Şekil 3.1. Bitümün statik yükler altındaki visko-elastik davranışı [11, 60]

Bitümlü bir malzemenin hareketli araç tekerleklerinden oluşan bir dinamik yüklemeye karşı gösterdiği tepki Şekil 3.2’de görülmektedir.



Şekil 3.2. Bitümün dinamik yükler altındaki visko-elastik davranışı [11, 60]

Şekil 3.2’de görülen deformasyon-zaman grafiğinde, yükün etkimesinden önceki ve sonraki değerlere bakıldığında büyük oranda elastik şekil değiştirme ile birlikte az da olsa kalıcı şekil değiştirme görülmektedir. Sadece bir tekerlek yükü için gösterilen şekil değiştirme, aslında çok küçük olmasına rağmen, buna benzer milyonlarca dingil yükü

uygulanması sonucunda kalıcı şekil değiştirmelerin toplamı büyük bir miktara ulaşarak kaplama yüzeyinde kalıcı deformasyona neden olmaktadır. Bahsedilen her iki durumda da deformasyonlar; yüksek sıcaklık, ağır veya hareketsiz trafik etkisiyle artış göstermektedir.

Modifiyerlerin başlıca görevlerinden biri de bitümün veya bitümlü sıcak karışımın yüksek sıcaklıklar altında kalıcı deformasyona karşı direncini, başka sıcaklıklardaki bitüm veya karışım özelliklerini olumsuz etkilemeksizin arttırmaktır. Bu işlem, kalıcı şekil değiştirmede azaltma meydana getirmek amacıyla karışımın toplam visko-elastik tepkisini düşürerek ya da bitümün elastik bileşenini arttırarak viskoz bileşeni azaltmak yoluyla gerçekleştirilmektedir.

Bitümün sertliğinin arttırılması aynı zamanda karışımın da sertliğini arttıracak buna bağlı olarak da malzemenin yük yayma yeteneği ile kaplamanın yapısal mukavemeti ve beklenen tasarım ömrü iyileşecektir. Kaplama tabakaları kalınlıklarının arttırılması da aynı etkiyi göstermektedir ancak bu durum ilk yapım masrafının yüksek olmasına neden olmaktadır. Bitüm modifikasyonu ile daha ince bir tabaka oluşturarak kaplamanın yapısal mukavemetini arttırmak mümkündür. Ayrıca, yüksek çekme deformasyonlarının bulunduğu durumlarda büyük önem taşıyan asfalt esnekliği de bitümün elastik bileşeninin arttırılması ile geliştirilecektir [11].

### **3.2. Katkı Kullanımının Amacı**

Modifiye bitümlerin ve karışımların kullanım amaçları aşağıda özetlenmiştir.

- a. Düşük sıcaklıklar için daha yumuşak karışımlar elde etmek ve çatlakları azaltmak
- b. Yüksek sıcaklıklar için daha sert karışımlar elde etmek ve tekerlek izinde oturmayı azaltmak
- c. Yapım sıcaklıklarında viskoziteyi düşürmek
- d. İşlenebilirliği ve sıkışmayı iyileştirmek
- e. Karışım dayanımını ve stabilitesini arttırmak
- f. Karışımın aşınma dayanımını iyileştirmek ve agrega kopmasını azaltmak
- g. Kaplamanın düşük sıcaklık çatlaklarını azaltmak
- h. Karışımın yorulma dayanımını iyileştirmek
- i. Marjinal asfalt çimentolarının kalitesini yükseltmek
- j. Yaşlanmış asfalt bağlayıcıyı tekrar gençleştirmek

- k. Marjinal agregaların kullanımı sağlamak
- l. Asfalt bağlayıcının ömrünü uzatmak
- m. Agregada üzerinde daha kalın asfalt filmi oluşturmak
- n. Yapışmayı iyileştirmek ve asfalt çimentosunun agrega yüzeyinden soyulmasını azaltmak
- o. Geliştirilmiş çatlak dolgusu sağlamak
- p. Yakıt döküntülerine karşı dayanım artışı sağlamak
- q. Yaşlanmaya ya da oksidasyona karşı dayanımı artırmak
- r. Kaplama tabakalarının kalınlığını azaltmak
- s. Kaplamanın ömür-döngü maliyetini azaltmak
- t. Kaplamaların tüm performansını geliştirmektir [36].

### 3.3. Bitüm Katkı Maddeleri ve Katkılı Bitümlerde Aranılan Özellikler

Modifikasyonda kullanılacak katkı maddelerinin ve modifiye bitümlerin uygulamada etkili, uygun ve ekonomik olması bakımından sağlaması gereken koşullar aşağıda verilmiştir:

- a. Kolay elde edilebilmelidir
- b. Asfalt karışım sıcaklığında özelliklerini kaybetmemelidir
- c. Asfaltla homojen olarak karışabilmelidir
- d. Asfaltın yüksek karıştırma ve serme sıcaklıklarında, çok fazla viskoz hale getirilmeden, yüksek yol sıcaklıklarında akışkanlığa karşı dirençlerini arttırmalıdır
- e. Düşük sıcaklıklarda asfaltın çok kırılğan ya da sert olmamasını sağlamalıdır
- f. Maliyetleri ekonomik olmalıdır.

Katkı maddelerinin bitümle karıştırılmasından sonra ise şu özelliklere sahip olması istenmektedir:

- a. Depolama, uygulama ve hizmet sırasında sahip oldukları özellikleri korumalıdır
- b. Uygun ekipmanla işlenebilirlik özelliğine sahip olmalıdır
- c. Depolama, uygulama ve hizmet sırasında fiziksel ve kimyasal olarak stabil olmalıdır.

Normal uygulama sıcaklıklarında püskürtülebilme ve agregayı sarabilme akışkanlığını sağlayabilmelidir [1, 28, 33, 61].

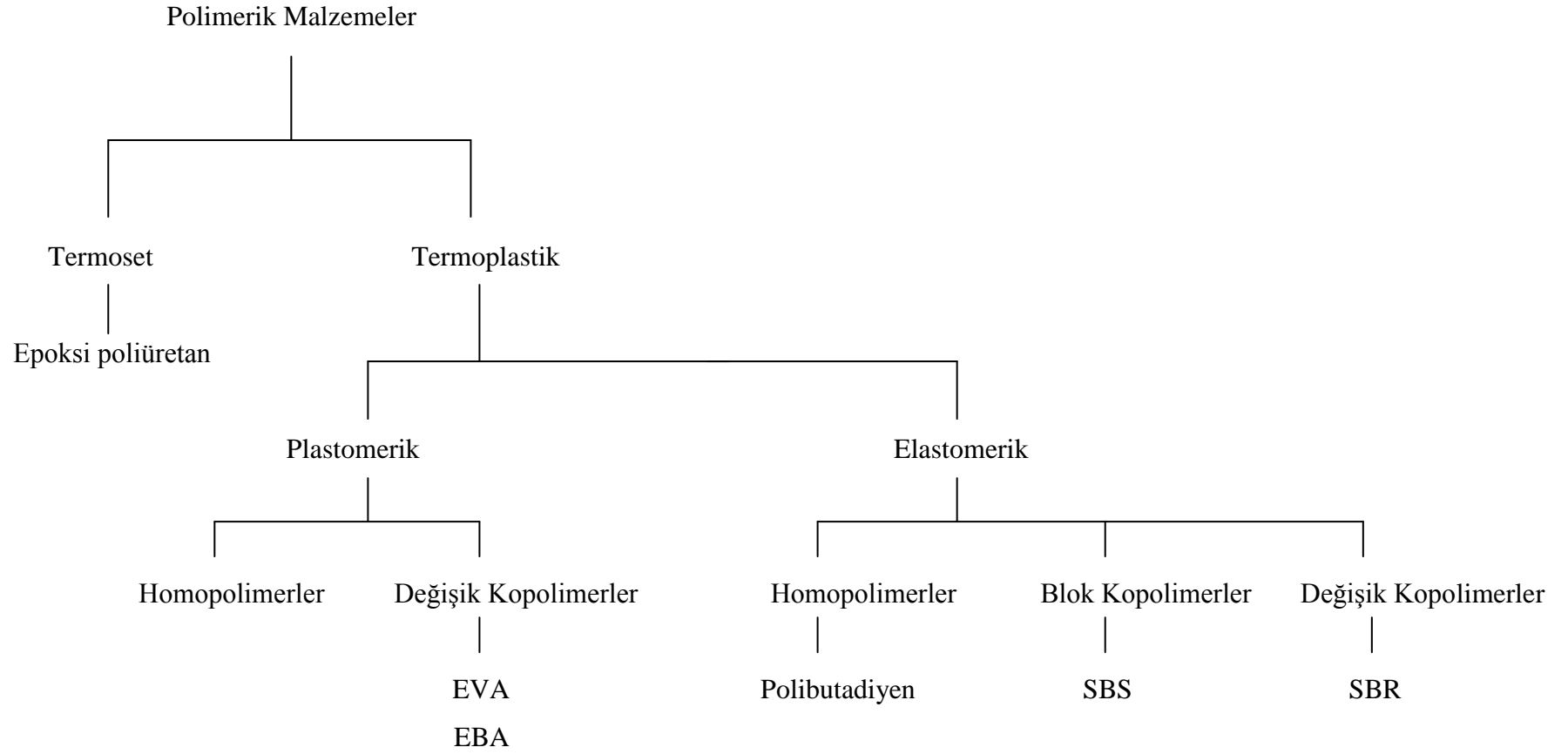


### 3.4. Bitüm Katkı Maddelerinin Sınıflandırılması

Bitüm katkı maddeleri çeşitli şekillerde sınıflandırılabilir. Katkı maddesinin tipini, örneklerini ve katkı maddesinin bitüm kıvamına etkisini gösteren genel bir sınıflandırma Tablo 3.1’de ve Şekil 3.3’te verilmiştir.

**Tablo 3.1.** Bitüm katkı maddelerinin genel sınıflandırılması [33]

| Tip  | Özellikler  |
|--|---|
| 1. Filler  | <ul style="list-style-type: none"><li>• Karbon Siyahı</li><li>• Mineral Filler</li><li>• Uçucu Kül</li><li>• Taş Tozu</li><li>• Kireç</li><li>• Portland Çimentosu</li></ul>  |
| 2. Genleştirici<br>(Ekstender)   | <ul style="list-style-type: none"><li>• Sülfür</li><li>• Lignin (Odun Özü)</li></ul>  |
| 3. Elastomerler<br>a. Doğal Lateks<br>b. Yapay Lateks<br>c. Blok Kopolimer<br>d. İşlenmiş Kauçuk | <ul style="list-style-type: none"><li>• Doğal Kauçuk</li><li>• Stiren-Butadien-Kauçuk (SBR), Stiren-Butadien-Stiren (SBS), Stiren-İzopren-Stiren (SIS)</li><li>• Stiren-Butadien Di-blok Kopolimerler</li><li>• Geri dönüştürülmüş kauçuk</li></ul> |
| 4. Plastomerler<br>(Termoplastikler)   | <ul style="list-style-type: none"><li>• Etilen Vinil Asetat (EVA)</li><li>• Polivinil Klorid (PVC)</li><li>• Etilen Polipropilen (EPDM)</li><li>• Polietilen / Polipropilen</li><li>• Etilen Akrilik Kopolimer</li></ul>                            |
| 5. Soyulma Önleyici  | <ul style="list-style-type: none"><li>• Aminler</li><li>• Kireç</li></ul>   |
| 6. Hidrokarbonlar<br>(Doğal asfaltlar)   | <ul style="list-style-type: none"><li>• Gilsonit</li><li>• Trinidad Göl Asfaltı</li><li>• Yeniden Kullanma ve Gençleştirme Yağları</li></ul>  |
| 7. Antioksidanlar  | <ul style="list-style-type: none"><li>• Kurşun Karışımları</li><li>• Karbon Tuzu</li><li>• Kalsiyum Tuzu</li></ul>  |
| 8. Oksidan   | <ul style="list-style-type: none"><li>• Manganez Tuzu</li></ul>   |



**Şekil 3.3.** Polimerlerin sınıflandırılması [62]

### 3.5. Bitümlü Sıcak Karışımlarda SBS Kullanımı

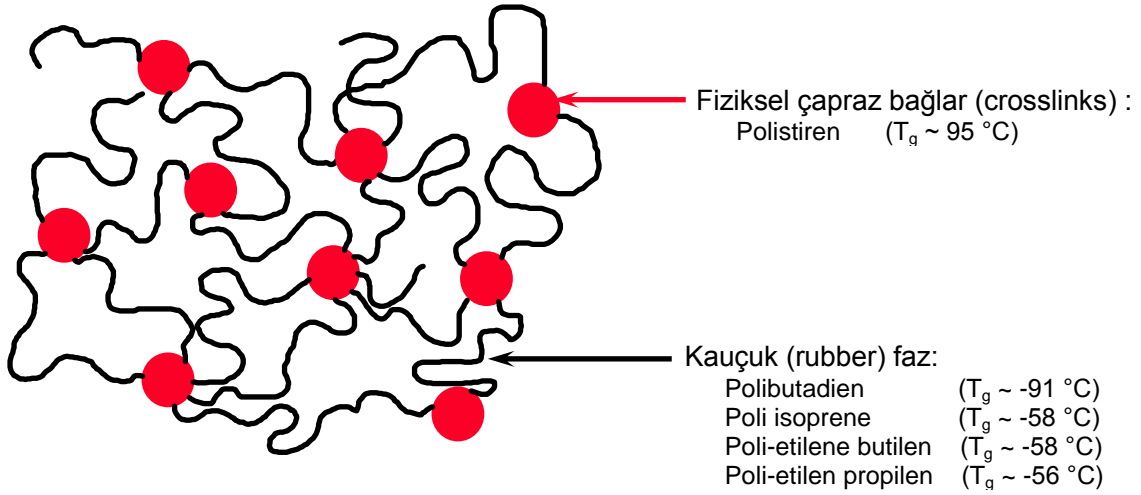
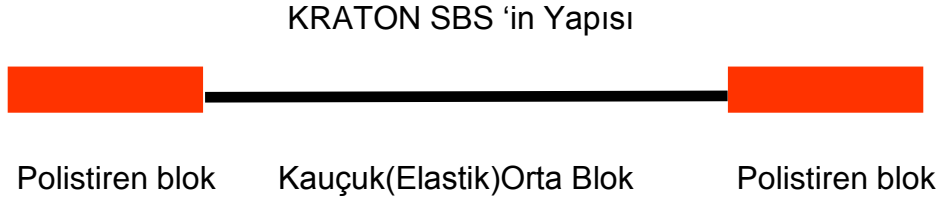
Karayolu üstyapılarında bitüm modifikasyonunda polimer türü katkıları uzun zamandan beri kullanılmaktadır. Çok fazla polimer çeşidi olmasına rağmen çok az sayıda polimer bitüm modifikasyonu için uygundur [63]. Modifiye bitüm üretiminin ilk uygulamalarında katkı maddesi olarak doğal malzemeler kullanılmıştır. 1823 yılında bir İngiliz tıpa üreticisi tarafından doğal kauçuk içeren bitüm için patent alınmıştır. II. Dünya Savaşı'ndan sonra sentetik polimerler, bitüm modifikasyonunda kullanılan doğal kauçukla yarışmaya başlamıştır. Genellikle polimer-bitümler olarak ismi kısaltılan polimer modifiyeli bitümler; termoplastik malzeme, sentetik reçine, toz haline getirilmiş kauçuk veya elastomer gibi maddelerle birlikte bağlayıcı maddelerin bitüme eklenmesiyle elde edilmektedir [64].

SBS, stiren-butadiyen-stiren blok kopolimerinin kısaca adlandırılmasıdır. Bulunuşu Shell firması tarafından 1960'larda yapılan petrokimya türevi bu sentetik kauçuk ailesi, ayakkabı tabanı, su yalıtım membranı, hot-melt yapıştırıcılar gibi endüstriyel birçok alanda hammadde olarak kullanılmaktadır. SBS, 1985 yılından beri esnek kaplamalarda kullanılmaktadır ve 2001 yılında 125.000 ton kullanılarak pazarda en büyük orana sahip olmuştur.

SBS blok kopolimerleri kullanılarak yapılan birçok çalışma sonucunda SBS'nin bitümün rijitliğini arttırmasının yanı sıra düşük servis sıcaklıklarında çatlama, yüksek servis sıcaklıklarında ise tekerlek izi oluşumu ve yorulmaya karşı dayanımını arttırdığı belirlenmiştir [9, 10, 65].

Ancak asfaltın oranı yüksek, polimer modifiye bitüm üretimi için elverişsiz denebilecek bitümlerin kullanılması durumunda, reaktifliği yüksek ve iyi karışabilme özelliği olan Kraton MD243'ün daha iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Benzer sonuçlar; diğer bir vinil modifiyeli SBS türü olan Kraton D1192 ile de alınabilmekte ve bu ürün yol endüstrisinde halen başarı ile kullanılmaktadır. Kraton tarafından yüksek vinil modifiyeli yeni bir SBS türü geliştirilmiştir. Bu ürün standart SBS'lere göre ileri derecede gelişmeler sağlamaktadır. Kısa zincirli olan yeni moleküllü ürün daha iyi karışabilme ve düşük viskozite özelliklerine sahiptir. Ayrıca bu ürün bitüm bileşenleri ile reaktif bir etkileşime girerek homojen ve iyi karışımlar elde edilebilmektedir. Bu yeni teknikte sert bitümlerin bitümlü temelde kullanımı ve yorulma direncine katkı sağlamanın mümkün olduğu yapılan çalışmalarla ispatlanmıştır [66].

Yol uygulamalarında en fazla kullanılan ürün ise ticari ismi KRATON D 1101 olan üründür. Bu ürünün yapısı da aşağıda görüldüğü gibi lineerdir (Şekil 3.4.).



Şekil 3.4. SBS türü polimerlerin yapısı

KRATON D 1192 polimerinin ise stabilite ve yaşlanma direnci açısından özellikle modifiye bitüm emülsiyonu uygulamalarında daha iyi sonuçlar verdiği belirtilmektedir. Shell firması tarafından üretilen KRATON D 1101 ve D 1192 SBS türlerinin özellikleri Tablo 3.2'de verilmiştir.

**Tablo 3.2.** KRATON D 1101 ve D 1192 SBS türlerinin özellikleri

| Özellik  | D 1101                | D 1192                |
|--|-----------------------|-----------------------|
| Çekme Dayanımı, psi <sup>1,2</sup>   | 4600                  | -                     |
| %300 modülü, psi <sup>1,2</sup>  | 400                   | -                     |
| Uzama, % <sup>1,2</sup>  | 880                   | -                     |
| Kopma uzaması, % <sup>1,2</sup>  | 10                    | -                     |
| Sertlik, (10 sn) <sup>3</sup>  | 69                    | 66                    |
| Özgül Ağırlık, gr/cm <sup>3</sup>  | 0,94                  | 0,94                  |
| Brookfield viskozitesi, cP, 25°C <sup>4</sup>  | 4000                  | 1500                  |
| Yumuşama indeksi, 200°C/5 kg   | < 1                   | < 1                   |
| Yağ içeriği, ağırlığın %'si  | 0                     | 0                     |
| Stiren/Kauçuk oranı  | 31/69                 | 30/70                 |
| Fiziksel yapısı  | Gözenekli granül, toz | Gözenekli granül, toz |
| Diblok, %  | 16                    | < 1                   |
| 1. ASTM D 412 yöntemi ile çekme deneyinde çekme hızı 10 in./dak.<br>2. Tipik özellikleri toluen solüsyonundaki film halindeki görüntüsünden elde edilmiştir.<br>3. Polimer özellikleri 175°C sıcaklıkta tespit edilmiştir.<br>4. Ağırlıkça %25 oranında toluende çözülmüş saf polimer solüsyonu denenmiştir. |                       |                       |

Üç tip Kraton D 1101 SBS polimer bulunmaktadır. Bunlar;

- Kraton D 1101 CS → Gözenekli granül görünümünde olanlar
- Kraton D 1101 AF → Patlamış mısır görünümünde olanlar
- Kraton D 1101 CM → Toz halinde olanlardır. Bütün bu ürünlerde tanelerin birbirine yapışmasını önlemek için amorf silika kullanılmıştır.

Yapılan bir çalışmada; B 100/150 bitümüne % 3 ve % 4,5 oranlarında KRATON D 1101 ve % 1,5 ve % 2 oranında Elvaloy<sup>®</sup>RET ilave edilmesiyle hazırlanmış modifiye bağlayıcıların kompleks kayma modülü değerlerinin saf bitüme göre daha yüksek olduğu, polimerlerin bitümün deformasyonlara karşı dayanımını arttırdığı tespit edilmiştir. KRATON D1101 ve Elvaloy<sup>®</sup>RET ile modifiye edilmiş bitümlü bağlayıcıların faz açısı değerlerinin düşük olması,

bu tür bağlayıcıların saf bitüme göre daha fazla elastik ögeye sahip olduğunu, dolayısıyla daha fazla deformasyonun geriye dönmesine olanak sağlandığı belirlenmiştir [59].

Farklı frekanslarda yük uygulanarak yapılan DSR deneyleri sonucunda, polimer katkılı bağlayıcıların tekerlek izi parametresi, katkısız bitüme göre daha yüksek çıkmış, dolayısıyla her iki polimer de bitümün tekerlek izi dayanımını önemli ölçüde artırmıştır. Bu durum saf bitümün, polimer katkıları sayesinde daha yüksek sıcaklıklarda kullanılabileceğini göstermiştir [67].

Kraton polimerleri güvenlik açısından değerlendirildiğinde; depolama yerinin iyi havalandırılmış, güneş ışığını doğrudan almayan, normal oda sıcaklığında ve kıvılcım çıkarabilecek kaynaklardan uzakta olması gerekmektedir. Emniyet şartlarına dikkat edildiği takdirde Kraton D 1101 polimerinin insan sağlığını kötü yönde etkilediğini gösteren bir kanıt bulunmamaktadır. Kraton polimerlerinin toksin olmadığı ayrıca nötr ve biyolojik olarak aktif olmayan malzemeler oldukları tespit edilmiştir. Bunun yanında; ısınma ve tanelerin aşırı hareketi ile oluşabilecek statik elektriklenmenin artmasını önleyecek tedbirlerin de alınması gerekmektedir. Yüksek sürtünmeli değirmenlerde Kraton polimerlerinin kullanılması ısı artışına neden olmaktadır. Bu sırada sıcaklığın 225–230°C'nin üstüne çıkmamasına dikkat edilmelidir. Bu sıcaklıklar aşırsa yangın riskine karşı tedbirler alınmalıdır.

SBS'nin yapısı incelendiğinde ise aşağıdaki sonuçlar çıkarılabilmektedir:

- Polistiren adacıkları fiziksel çapraz bağlar oluşturarak sağlamlık verir
- Düşük sıcaklık altında elastisite modülünde keskin artışlar görülür
- Su, alkol veya seyreltik asitlerle etkileşime girmez
- Ketonlar, esterler ve hidrokarbonlarda çözülebilir
- Polibütadien köprüleri elastiklik ve esneklik sağlar.
- 100°C nin üstünde polimer akıcı hale gelir soğuyunca üç boyutlu ağ yapısı tekrar oluşur. Madde termoplastik elastomer olduğu için bu ısıtma ve soğumalarda özelliğinden hiçbir şey kaybetmez.
- -40°C ile +80°C arasında özelliğini korur [68].

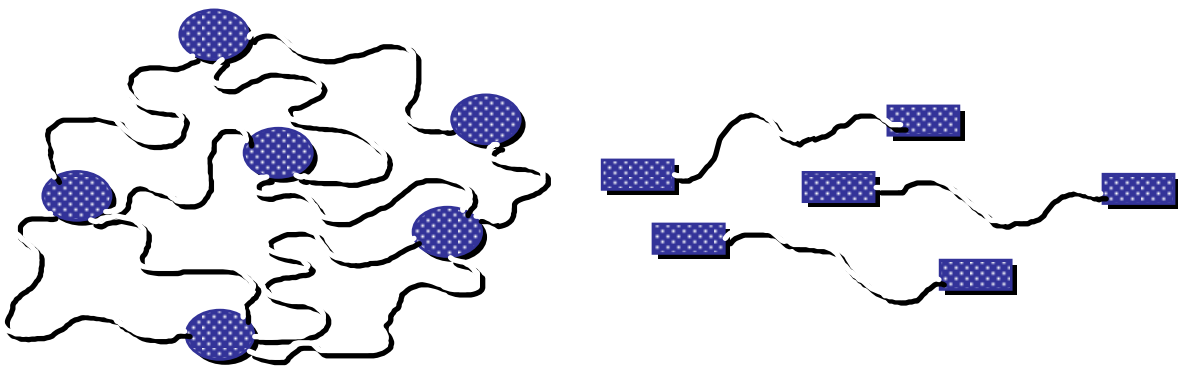
SBS'nin istenen özelliklerini geliştirmek için inorganik filler, petrol yağları, asfaltlar ve reaktif monomerler gibi diğer materyaller ile bileşik elde edilebilir. SBS; kaplama dizaynında asfalt bağlayıcı gibi kullanılabilir. Ayrıca SBS bağlayıcılar yüksek yumuşama sıcaklığına sahiptir [68].

Bitüme hangi oranda SBS'nin katılacağı tamamen uygulama bölgesinin iklimine, trafik şartlarına ve kullanılan bitümün özelliklerine bağlıdır. Bitüm içinde sürekli bir polimer fazı oluşturmak için minimum %3 oranında SBS kullanılmalıdır. En fazla ise %7 oranına kadar SBS kullanıldığı olmuştur.

SBS/Bitüm karışımı eğer homojen ise veya mekanik olarak film halinde açıldığında çözünmemiş parçacıklar görülüyorsa SBS'nin bitüm ile tam olarak karıştığı ifade edilebilmektedir. Karışımın yumuşama noktası veya viskozite değerlerinin referans grafiklerle mukayese edilmesi sonucu homojenlik kontrol edilebilmektedir. Bütün çözünme işlemlerinde olduğu gibi SBS'nin bitüm içinde çözünmesinde rol oynayan faktörler aşağıdaki gibidir:

- Polimerin yüzey alanı (granül veya toz olması)
- Sıcaklık
- Bitüm kompozisyonu
- Sürtünme gücü
- Polimerin tipi

SBS ile bitümün karıştırılması tamamen bir çözünme olayı olup kimyasal bir reaksiyon değildir. Bitüm içindeki kendine benzeyen yapıları içine alan SBS, hacminin 10 katına kadar şişebilmektedir. Böylece bitüme %5 oranında SBS katıldığında, %50'si polimer fazı olan bir karışım elde edilmektedir. Bitüm içerisindeki SBS ısıtıldığında ağ yapısından sıyrılarak akıcı hale gelmekte ve bitümle kolayca karışmaktadır. Karışımın yumuşama noktasının altına düştüğünde ise üç boyutlu ağ yapısı tekrar oluşmaktadır (Şekil 3.5.).



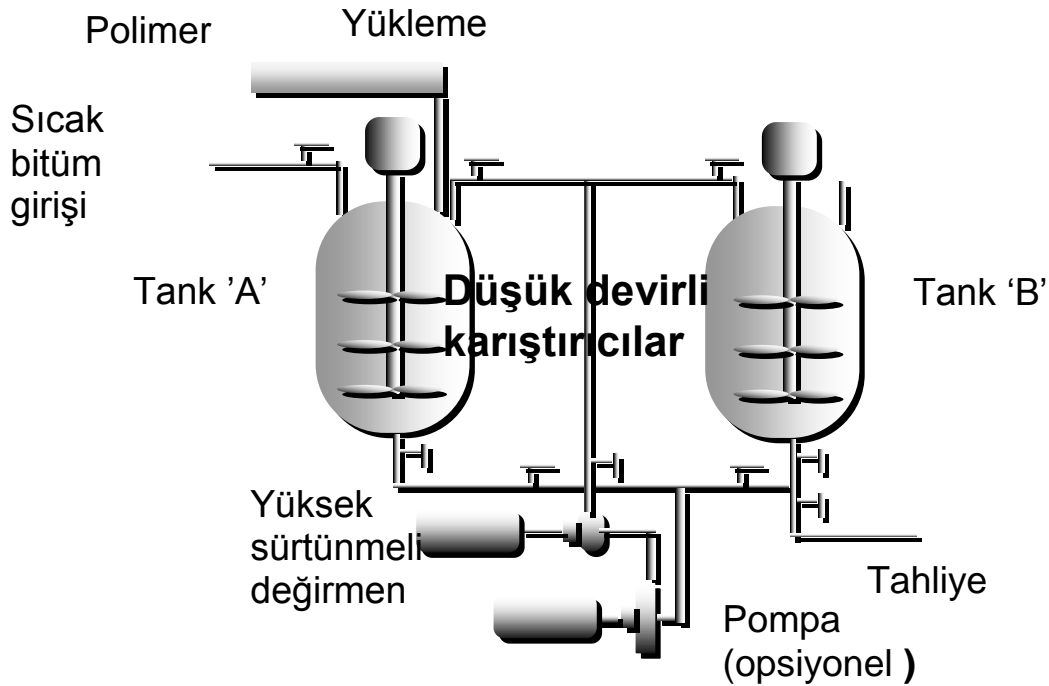
Şekil 3.5. Bitümle karışım sıcaklığında ve düşük sıcaklıklarda SBS'nin yapısı

Farklı SBS çeşitlerine göre yüksek sürtünme güçlü veya düşük devirli karıştırıcı ekipmanlar kullanılarak polimer modifiye bitüm (PMB) üretmek mümkündür (Şekil 3.6.).

Çözünme işlemi tamamlandıktan sonra karışımın bir süre olgunlaşması için beklenmesi önerilmektedir. Bu sayede SBS bitümün tüm uygun bileşenlerini bünyesine alabilmektedir.

Hazırlanan PMB agregayla karıştırıldıktan sonra serme ve sıkıştırması mevcut ekipmanlarla yapılır. Bu işlemler sırasında dikkat edilmesi gereken tek nokta serme - sıkıştırma sıcaklığının her bir SBS yüzdesi için 2,5 °C artırılmasıdır. Serme ve sıkıştırma işlemleri sırasında soğumaya izin vermeden işlemin bitirilmesine dikkat edilmelidir. Aksi takdirde serme işlemi homojen olamayabilir.

SBS'li bitümün kullanılmaması durumunda bozulmayacağı, kısa süreli (birkaç günden 1–2 haftaya kadar) depolama yapılması gerektiğinde 130°C–140°C sıcaklıkta karışımın düşük devirli karıştırıcı ile sürekli karıştırılarak homojen tutulması gerektiği, daha uzun süreli depolama gerektiğinde ise karışımın soğutulup daha sonraki kullanımlar için saklanabileceği ayrıca SBS'nin bitüm içinde tamamen çözünmesi sağlandığı takdirde pratikte bir sorunla karşılaşılmayacağı üretici firma tarafından belirtilmektedir [69].



Şekil 3.6. SBS modifikasyonunda kullanılan ekipman

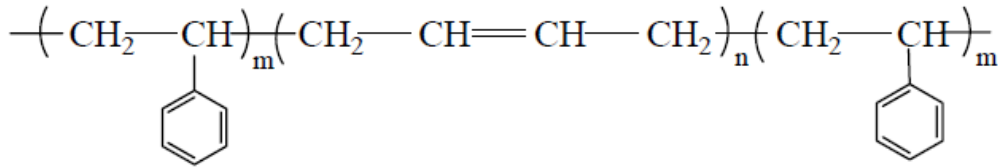
Yola etkiyen yükün oluşturduğu çok küçük deformasyonların birikmesiyle kaplama yüzeyi bozularak kalıcı deformasyonlar oluşmaktadır. Sıcaklık artışı ise bu bozulmayı hızlandırmaktadır. SBS'nin yapısında var olan yüksek elastiklik ve artan viskozite kalıcı deformasyonu önemli ölçüde geciktirmektedir. Sıcaklığın düşmesi ile bitüm gevrek bir yapı



halini almaktadır. Mevsimsel değişikliklerle artan gerilmeler de termal çatlaklara neden olmaktadır. Gece-gündüz sıcaklık farklarından da oldukça etkilenen termal çatlama, bitümün sertleşmesi ile ilgilidir. Sıcak bölgelerde bile termal çatlama görülmesinin nedeni bu bölgelerde sert bitüm kullanılmasıdır.

Esnek kaplamalarda en büyük sorunlar çatlak oluşumu ve bu çatlakların büyümesi ile oluşur. Başlangıçta oluşan mikro çatlaklar kaplamanın ısınması ile eski haline dönse de eğer bu çatlakları hapseden kuvvetli bir bitüm yapısı bulunmuyorsa ise oluşan bu mikro çatlaklar büyüyerek makro çatlaklara dönüşmektedir. Termal çatlama mekanizması yorulma çatlağı için de geçerlidir. Oluşan çatlaklar yolun yüzeyini bozarak kaplama yapısından içeri giren suyun özellikle soğuk iklimlerde temel tabakasına kadar tahribata yol açmasına neden olmaktadır.

3 bağlı kopolimerler; üç boyutlu ağ yapısı ve elastik kauçuk adacıkları ile asfalttaki mikro çatlakları hapsederek onların büyüüp yayılmasını önlemektedir. Kimyasal yapısı Şekil 3.7’de verilen SBS, bitüm içindeki tüm bileşenlerden daha yüksek bir molekül ağırlığına sahiptir [66]. Bu nedenle ortam sıcaklığında fiziki olarak katılaştırılmış elastomerlerden ayırt edilemezler. Yüksek adezyon, kohezyon ve elastik özelliklerinden dolayı sürtünmelerden kaynaklanan soyulma ve agrega kaybına karşı dayanımı arttıran SBS; özellikle ağır trafik yüküne sahip ve sıcaklık farkının fazla olduğu bölgelerde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.



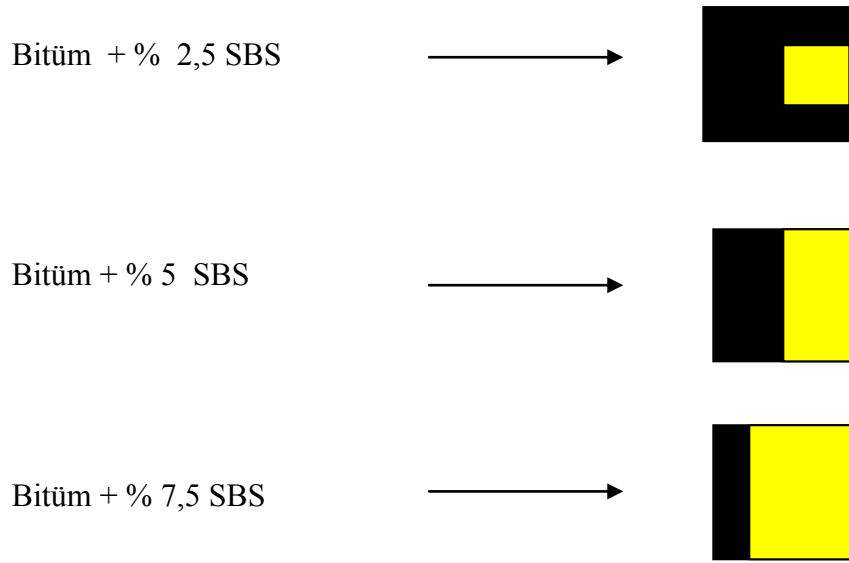
Şekil 3.7. SBS'nin kimyasal yapısı

Kumar ve ekibi (2006), yapmış oldukları çalışmada SBS ve düşük yoğunluklu polietilen'in (LDPE) bitümlü bağlayıcı ve karışımların performansı üzerindeki etkilerini incelemiştir. Deney sonuçlarından her iki katkı maddesinin kalıcı deformasyona karşı dayanımı arttırdığı belirlenmiştir [70].

Lu ve Isacson (1998), yapmış oldukları çalışmada Stiren-Bütadiyen-Stiren içeren modifiye bitümlerin düşük sıcaklık özelliklerini geleneksel metotlar (penetrasyon, yumuşama noktası, düktilite ve Fraas Kırılma Noktası gibi deneysel test metotları), dinamik mekanik analizler (DMA) ve kiriş eğme reometresi kullanarak araştırmışlardır. Elde edilen sonuçlardan

her üç yöntemde de bağlayıcı parametrelerinin SBS'den olumlu yönde etkilendiği belirlenmiştir [71].

Aglan ve ekibi (1993) tarafından yapılan çalışmada ise, SBS katkı maddesinin bitümlü sıcak karışımların yorulma ömrü üzerindeki etkileri incelenmiş olup uygulanan deneyler sonucunda SBS'nin bitümlü sıcak karışımların yorulma ömrünü önemli oranda arttırdığı tespit edilmiştir [9]. Görkem ve Şengöz, SBS kullanımı ile BSK'ların nem hasarına karşı dayanımının arttığını belirlenmişlerdir [72]. SBS ile bitüm arasındaki etkileşim Şekil 3.8.'de gösterilmektedir [62]. Şekilde siyah kısım bitümü, sarı ile gösterilen kısım ise polimer fazı göstermektedir.



Şekil 3.8. SBS / bitüm etkileşimi [62]

Polimer modifiyeli bağlayıcıların üretim, depolama, nakliye, taşıma ve uygulamalarına yardımcı olmak amacıyla da Avustralya Asfalt Üstyapı Birliği (AAPA) tarafından bir rehber hazırlanmıştır [73]. Üretim deneyleri ile kontrol edilerek hazırlanmış polimer modifiyeli bitüm (PMB) malzemelerinin kalitesini içeren bu rehber;

- Sıcak PMB üretimi ve kullanımı için ilkeler sağlamak
- Ürün teslimlerinde, ürün kalite içeriklerinde kullanıcılara güven vermek
- Sevkiyat, depolama ve uygulama yöntemleri süresince ısıtma veya yanlış kullanımdan dolayı meydana gelebilecek zararları azaltmak hedeflenmiştir.

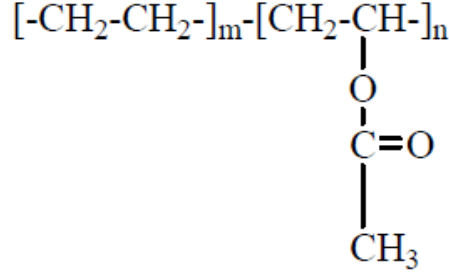
PMB genellikle bitüm ve polimer türü katkı içermektedir. Bazı durumlarda; özellikle performans karakteristiklerini kazandırmak ve karışıma katkı sağlamak için bitüme

birleştirme maddeleri ve diğer katkı maddeleri karıştırılmaktadır. Vinil modifiyeli SBS'lerin, kısa molekül zincirleri nedeniyle bitümle daha iyi karışmanın yanı sıra reaktif özellikleri nedeni ile bitüm içindeki bileşenlerle çok iyi etkileşime girdikleri gözlenmiştir. Bu durum, PMB'nin daha iyi performans göstermesini sağlamaktadır. Kraton şirketi, yüksek vinil modifiyeli yeni bir SBS türü geliştirmiştir. Bu ürün diğer SBS türlerine göre daha iyi sonuç vermektedir. Malzemelerin dikkatlice karıştırılması ve üretim kontrolü ile modifiye bitümün belirli özellikleri sağlanmaktadır. Üretim, depolama, taşıma ve yüksek sıcaklıklarda polimerin erken bozulmasını engellemek için her aşamada sıcaklık kontrol edilmeli ve dikkatlice izlenmelidir [74].

Birçok araştırma, saf bitümün özelliklerinin tanımlanmasında kullanılan geleneksel deneylerin PMB için yeterli olmadığını göstermiştir. Saf bağlayıcı şartnameleri genellikle penetrasyon, yumuşama noktası, düktilite ve Fraas kırılma noktası gibi deney yöntemlerini esas almaktadır. Bu test yöntemleri çok uzun süre kullanılmış olup bitümlü bağlayıcılar hakkındaki mevcut bilgi de bu metotlar kullanılarak hesaplanan sonuçları temel almaktadır. Yeni bağlayıcının özellikleri değerlendirilirken deneysel yöntemler yardımıyla karakterize edilmiş bağlayıcılar ile bir karışlaştırma yapılır. Doğrudan bir karışlaştırma yapmak için aynı yöntemler kullanılmaktadır. Penetrasyon ve yumuşama noktası gibi test metotlarının ön planda olması için başka bir neden de; bu metotların uygulaması oldukça kolay ve test masrafları diğer yöntemlere nazaran düşüktür. Fakat modifiye bitümlerin davranışlarının belirlenmesinde geleneksel deneylerin yeterli olmadığı bu nedenle ileri deneylerin kullanılması gerektiği belirtilmektedir [75].

### **3.6. Bitümlü Sıcak Karışımlarda EVA Kullanımı**

Bitümlü bağlayıcı veya karışımların modifikasyonu için kullanılan çeşitli katkı maddelerinden biri de etilen vinil asetat (EVA) kopolimerlerdir. EVA kopolimerleri; polietilen moleküllerindeki etilenin yüksek basınç altında ayrıştırılmasıyla elde edilen düşük yoğunluklu polietilen reçinenin (LDPE) teknolojik ve normal olarak topaklanmış (tanelenmiş) formundan üretilmektedir. Bu kopolimerler; kabaca küresel şekilde olup yaklaşık 1/8 inch (3,175 mm) çapındadır. EVA'nın kimyasal yapısı şekil 3.9.'da görölmektedir [68].



Şekil 3.9. Etilen vinil asetatın kimyasal yapısı [68]

EVA kopolimeri, etilen ve vinil asetatın ortak polimerizasyonu ile üretilen düzensiz yapılı termoplastik malzemelerdir. Vinil asetat miktarı arttıkça, kopolimer özellikleri de değişiklik göstermektedir. EVA kopolimerlerinin özellikleri genel olarak, moleküler ağırlığı ve vinil asetat oranı ile kontrol edilmektedir. EVA kopolimerleri; genellikle % 5 - 50 oranında vinil asetat (VA) içeren etilenden ibaret termoplastik malzemelerdir [77].

Birçok farklı katkı maddesi olmasına rağmen modifikasyon için en iyi sonuç veren katkı türü polimer türü modifiyerlerdir. Yapılan çeşitli çalışmalarda polietilen (PE), polipropilen (PP), polivinil klorid (PVC), polistiren (PS) ve etilen vinil asetat (EVA) gibi termoplastik malzemeler bitüm modifikasyonunda denenmiş ve normal servis sıcaklığında bitümün sertliğini ve viskozitesini arttırdıkları belirlenmiştir [11, 12, 77, 78].

EVA kopolimerleri; biçimlendirme, birleştirme ve çekme uygulamaları gibi değişik şekillerde kullanılmaktadır. Tipik kullanım yerlerinden bazıları; esnek hortum, boru, ayakkabı parçaları, oyuncaklar ve haddelenmiş otomotiv parçaları olarak sayılabilir. Düşük VA içeren EVA kopolimerleri röntgen filmlerinde kullanılmaktadır. EVA muhtevastaki VA'nın % 2-7 varlığı, filmin sertlik ve optik netliği gibi istenen özelliklerini arttırmaktadır [68]. EVA ayrıca karayolu sektöründe bitümlü bağlayıcılar için polimerik modifiyer olarak kullanılmaktadır. EVA, bitüm modifikasyonunda oldukça etkilidir. Düşük polimer muhtevastında küçük polimer zerrelere, sürekli bir bitüm fazında ışık kırıntıları tarafından şişirilmektedir. Polimer konsantrasyonu arttıkça sürekli bir polimer faz görülmektedir [68].

Yol uygulamalarında SBS ve EVA modifiyeli PMB kullanımı birçok önemli araştırmalara konu olmuştur. SBS, EVA polimerleri ile saf bitüm arasındaki etkileşimi incelemek ve yeterli bağı sağlamak için birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalarda geleneksel ve Superpave deney yöntemlerinin yanı sıra PMB'lerin morfolojik yapısı değerlendirilerek SBS ve EVA

polimerlerinin etkileri incelenmiştir. Modifiye bitüm numuneleriyle hazırlanmış asfalt karışımların mukavemet özellikleri de araştırılmıştır.

Yapılan bir çalışmada; SBS ve EVA kopolimerlerini içeren modifiyeli bitüm hazırlanarak laboratuvar ortamında denenmiştir. Numunelerin morfolojisi ve özellikleri; geleneksel ve Superpave test metotları ile flüoresan mikroskopu kullanılarak incelenmiş, SBS ve EVA içeren BSK'nın mekanik özellikleri analiz edilerek saf bitüm ile PMB'nin etkileri karşılaştırılmıştır. Sonuçlar polimer modifiye bitüm kullanımının BSK'ların özelliklerini önemli oranda iyileştirdiğini göstermiştir. Düşük polimer muhtevasında, numuneler sürekli bir bitüm fazında dağılmış polimer parçaları olarak meydana çıkmıştır [79].

SBS, EVA polimer ve temel bitümü arasındaki etkileşim ve uygunluğun araştırılması için birçok çalışma yapılmıştır. Geleneksel ve ileri deney yöntemleri kullanılarak SBS ve EVA modifiyeli PMB'lerin özelliklerini karakterize etmek için, bitüm fazları ile SBS ve EVA polimer dağılma durumu değerlendirilerek bitüm morfolojisi incelenmiştir. Modifiye bitüm numuneleriyle hazırlanan asfalt karışımlarının mukavemet özellikleri de çalışmalarla araştırılmıştır [80]. Çalışmada EVA polimeri olarak Arkema Şirketi tarafından üretilen granüler formu Evatane®2805 kullanılmıştır. Evatane®2805; özellikle yol kaplamaları ve bitüm modifikasyonu için tasarlanmış yüksek esnek plastomer olan vinil asetatın %27-29 unu muhteva eden bir polimerdir. Evatane®2805'in özellikleri Tablo 3.3'de verilmiştir.

**Tablo 3.3 . Evatane®2805'in özellikleri**

| <b><i>BİRLEŞİM</i></b>         | <b><i>Evatane®2805</i></b> |
|--------------------------------|----------------------------|
| Moleküler Yapı                 | Lineer                     |
| Yoğunluk                       | 0,92                       |
| Kopma Gerilme Mukavemeti (MPa) | 33                         |
| Sertlik (A)                    | 82                         |
| Fiziksel Form                  | Toz, granüler              |
| Buhar Akma Oranı               | 5 – 8                      |
| İşleme Sıcaklığı (°C)          | 65 – 80                    |
| Kopma Uzaması                  | 700 – 1000                 |

Aynı saf bitüme farklı muhtevalarda SBS ve EVA katılarak üretilen PMB özellikleri ile geleneksel bitüm testleri arasındaki farklar da bu çalışmada belirtilmiştir. Yüksek polimer muhtevasında; SBS modifiyeli bitümün EVA modifiyeli bitüme göre daha iyi sonuç verdiği

saptanmıştır. SBS modifiyeli karışımlar kontrol karışımları ile karşılaştırıldığında Marshall stabilite değerlerinin daha yüksek olduğu belirlenmiştir. EVA modifiyeli karışımların stabilite test sonuçları, EVA'nın PMB üzerinde uygulanan geleneksel bitüm testleri ile iyi bir bağ oluşturmadığını göstermiştir.

### **3.7. Bitümlü Sıcak Karışımlarda MD 243 Kullanımı**

Kraton MD 243; birçok farklı bitümlle uygun şekilde karışabilen bir polimerdir. Fakat bazen reaksiyon için ek süre gerektirebilmektedir. İyi bir PMB performans özellikleri elde etmek için tek faz yapısının geliştirilmesinin yanı sıra, reaksiyon zamanı da önemlidir. Karışım içinde gerçekleşen reaksiyonlar 1. dereceden reaksiyonlardır ve reaksiyon oranı her 10 °C'de sıcaklık artışında bu oranın 2 katına çıkmaktadır. Reaksiyon süresi 190°C - 200°C'de 1 ve 12 saat arasında olabilmektedir [81].

Kraton MD 243, saf bitüm ile harmanlanmış olabilen geçerli polimer muhtevasından sonra % 15'lik bir kısmı kolayca reaksiyona girdirilebilir. Uzun tecrübeler sonucunda bulunan yüksek konsantrasyonlu karışımların; aynı performans ve uyumluluğa ulaşmak için reaksiyon zamanını azalttığı tespit edilmiştir.

Kraton MD 243, belirli bir miktarda başka bir polimerle modifiye edildiğinde işlenebilirlik açısından sorun oluşturabilecek düşük viskoziteli sert bitümlerin modifikasyonunda kullanılmaya genellikle uygundur. Bu polimerin uygun bir süre içinde düşük hızdaki karıştırma işlemlerinde bile bitüm içerisinde çözünebilme özelliği vardır. Reaksiyon periyodu boyunca hafif bir karıştırma işleminin devam ettirilmesi tavsiye edilmektedir [81].

Vonk ve Scholten tarafından yapılan çalışmada; oldukça yüksek vinil kullanılarak hazırlanan ve MD 243 olarak adlandırılan yeni katkı malzemesinin asfaltten oranı yüksek, modifiye bitüm için çok uygun olmayan bitümlerde bile iyi sonuç verdiğini belirlemişlerdir. Çalışmada %23 asfaltten içeren ve bu nedenle PMB için zor olan Batman bitüm kullanılmıştır. Batman B 70/100 bitümüne ağırlıkça %3, %4 ve %5 SBS MD243 ilave edilmiş ve çeşitli deneylere tabi tutulmuştur. Sonuçlar, PMB üretimi için zor olan bitümlerde bile bu katkı maddesinin iyi sonuçlar sergilediğini göstermektedir. Ayrıca bu polimer yüksek oranlarda kullanıldığında bile normal SBS'ye göre daha düşük viskozitede artışa neden olduğu tespit edilmiştir [82].



tespit edilmiştir. Bu yeni polimer, bitüm ile tamamen homojen hale gelmesi için bir reaksiyon süresine ihtiyaç duymaktadır. Elde edilen katman inceliği sayesinde de önemli maliyet avantajları sağlamaktadır. Serilen her bir km başına %25 maliyet avantajı hesaplanmıştır. Ayrıca daha az doğal kaynaklı malzeme kullanımı sağladığından çevreci bir yaklaşım olduğu savunulmaktadır [66].

Sonuç olarak;

-Kraton tarafından geliştirilen yüksek vinil modifiyeli yeni bir SBS türü olan MD243'ün standart SBS'lere göre ileri derecede gelişmeler sağladığı yapılan çalışmalardan tespit edilmiştir.

-Yeni molekülü ürün kısa zincirli olduğundan daha iyi karışabilme ve düşük viskozite özellikleri sunmaktadır.

-Yeni molekülü ürün, bitüm bileşenleri ile reaktif bir etkileşime girip homojen ve iyi karışımlar sağlamaktadır.

-Yeni teknik ile sert bitümlerin bitümlü temelde kullanımı ve yorulma direncine katkı sağlaması mümkün olmaktadır.

-Yüksek rijitlik ve geliştirilmiş yorulma direnci daha ince tabakalı yol tasarımını mümkün kılmaktadır. Böylece her bir km için % 25 maliyet avantajı sağlanmış olmakta ve doğal kaynaklar daha az tüketilerek çevre dostu bir uygulamanın yolu açılmaktadır [66].



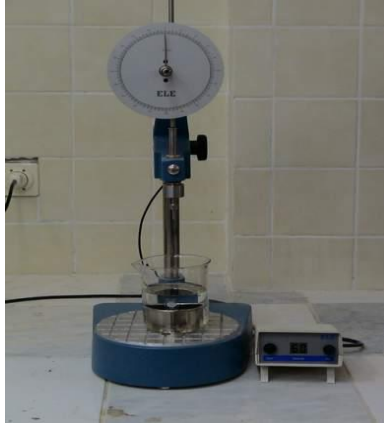
## 4. ÇALIŞMADA KULLANILAN DENEY YÖNTEMLERİ

### 4.1. Bağlayıcı Deneyleri

Bu çalışmada; saf ve polimer modifiyeli bağlayıcılara hem geleneksel hem de Superpave bağlayıcı deneyleri uygulanmıştır.

#### 4.1.1. Geleneksel Bağlayıcı Deneyleri

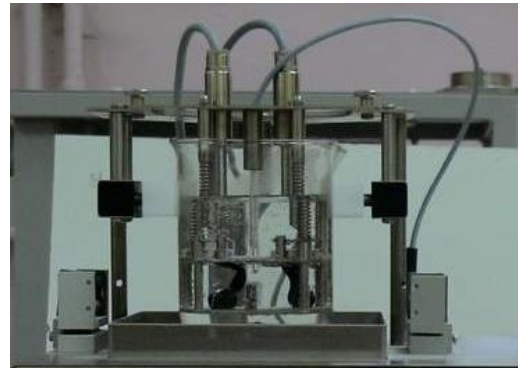
Çalışmada saf ve polimer modifiyeli bağlayıcılar üzerinde penetrasyon ve yumuşama noktası deneyleri uygulanmış olup bulunan değerlere göre penetrasyon indeksi değerleri belirlenmiştir. Bitümlü bağlayıcının kıvamını belirlemek amacıyla penetrasyon deneyi yapılmaktadır. Standart penetrasyon deneyi, 100 gr. ağırlığındaki bir iğnenin 25 °C sıcaklıkta ve 5 saniye süreyle bitüm içerisinde aldığı düşey mesafe olarak tanımlanmaktadır [84]. Penetrasyonun birimi  $10^{-1}$  mm'dir. Asfalt çimentolarının penetrasyon değeri kıvamla ters orantılı olmaktadır. Penetrasyon deney aleti Şekil 4.1'de gösterilmektedir.



Şekil 4.1. Penetrasyon deney aleti

Bitümlü bağlayıcıların yumuşama sıcaklığının tespiti amacıyla yapılan yumuşama noktası deneyinde bitüm doldurulmuş standart halka düzeneğe yerleştirilmekte ve bitüm üzerine standart bir bilye bırakılmaktadır. Deney başlangıç sıcaklığı 5°C'dir ve sıcaklık dakikada 5°C arttırılmaktadır. Yumuşama noktası değeri, bitümlü bağlayıcının tabana değdiği anda

termometrenin gösterdiği değer olarak alınmaktadır [85]. Otomatik yumuşama noktası deney aleti Şekil 4.2’de görülmektedir.



Şekil 4.2. Yumuşama noktası deneyi

Bitümlü bağlayıcıların ısıya karşı duyarlılıkları, karışım hazırlama sırasında enerji ve süre bakımından, uygulamada ise kaplamaların yüksek sıcaklıklarda kalıcı deformasyon ve düşük sıcaklıklarda termal çatlak oluşumu bakımından önemli bir yere sahiptir. Karışım hazırlama esnasında ısı hassasiyeti düşük olan bağlayıcılar işlenebilirlik bakımından olumsuzluklara neden olmasına rağmen kaplama performansını arttırmaktadırlar. Bitümlü bağlayıcıların ısıya karşı duyarlılığını tespit etmek amacıyla Shell tarafından geliştirilen yöntemde yumuşama noktası ve standart penetrasyon deney sonuçları kullanılarak Penetrasyon İndeksi (PI) değeri belirlenmektedir (Formül 4.1-4.2) [86].

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

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

Formüldeki  $P_{25}$ , bitümün  $25^{\circ}\text{C}$ 'deki penetrasyon değerini,  $T_{YN}$  ise yumuşama noktasını göstermektedir. PI değerleri, bitümlü bağlayıcıların ısıya karşı duyarlılıkları arttıkça azalmaktadır. Penetrasyon İndeksi'nin  $-2$ 'den küçük olması bitümün ısıya çok duyarlı olduğunu,  $+2$ 'den büyük olması ise ısıya karşı az duyarlı olduğunu göstermektedir.

#### 4.1.2. Superpave Bağlayıcı Deneyleri

Superpave yönteminde, bitümlü bağlayıcıların kısa dönem yaşlanmasını temsil etmesi amacıyla dönel ince film halinde ısıtma deneyi (RTFOT) ve uzun dönem yaşlanmayı temsil etmesi amacıyla basınçlı yaşlandırma aleti (PAV) deneyleri kullanılmaktadır. Bağlayıcıların işlenebilirlik özelliklerini belirlemek için dönel viskozimetre (RV), düşük ısı çatlaklarına karşı dayanımlarını belirlemek için kiriş eğme reometresi (BBR) ve direkt çekme deneyi (DTT), yüksek sıcaklık ve yorulma dayanımlarını belirlemek için de dinamik kesme reometresi (DSR) Deneyi uygulanmaktadır.

##### 4.1.2.1. Dönel İnce Film Halinde Isıtma Deneyi (RTFOT)

Karıştırma süresince bağlayıcının yaşlanması, laboratuarda dönel ince film halinde ısıtma deneyi ile temsil edilmektedir. Bu deneyde asfalt hazırlama tesislerinde karıştırma sırasında bitümlü bağlayıcının maruz kaldığı sertleşmeyi temsil edecek şekilde, ince bir film halinde hareket eden bitümlerin veya bitümlü bağlayıcıların üzerinde, sıcaklık ve havanın birlikte etkisi değerlendirilmektedir. RTFOT yöntemi ile bağlayıcıların ısıtma sonucu uçucu madde kaybı belirlenebilmekte ayrıca bu şekilde bitümlü malzemelerin sıcaklık ve havanın etkisiyle fiziksel özelliklerindeki değişimini tespit etmek için gerekli malzeme de elde edilebilmektedir. TS EN 12607-1'de belirtilen bu deney, 163°C sıcaklığa sahip etüve yerleştirilen 8 adet şişe kullanılarak yapılmaktadır (Şekil 4.3).



Şekil 4.3. Dönel ince film halinde ısıtma deney aleti

Deneyde, her bir şişeye 35 gram bitüm doldurulup düşey ekseninde dakikada 15 devir yapacak şekilde 75 dakika süreyle döndürülmektedir. Dönme esnasında deney aletinin

tabanında bulunan bir hava üfleyici yardımıyla şişelere, akışı  $4000 \pm 200$  ml/dak olacak şekilde hava verilmektedir. Sıcaklığın etkisiyle bitüm, şişeleri tam olarak kaplayacak ve ince bir film tabakası oluşturacaktır. Bu sayede yaşlanmanın meydana gelişi de kolaylaştırılmaktadır.

Bu sürenin sonunda iki numune kütle kaybını tayin etmek amacıyla, geri kalan altı numune ise bitümlü malzemelerin yaşlandıktan sonraki fiziksel özelliklerini tespit etmek amacıyla kullanılmaktadır. Kütle kaybı Formül 4.3 kullanılarak belirlenmektedir. Formüldeki  $M_1$  yaşlanmadan önceki ağırlığı,  $M_2$  ise yaşlanmadan sonraki ağırlığı ifade etmektedir [87].

$$\text{Kütle Kaybı, \%} = \frac{M_1 - M_2}{M_1} \times 100 \quad (4.3)$$

#### 4.1.2.2. Basınçlı Yaşlandırma Aleti (PAV) Deneyi

Basınçlı yaşlandırma aleti (PAV), kaplamanın servis ömrü boyunca bağlayıcılarda meydana gelen uzun süreli sertleşme özelliklerini belirlemek amacıyla kullanılmaktadır. PAV deneyi, RTFO deneyinden elde edilen bağlayıcılar üzerinde uygulanmaktadır. RTFO deneyinden elde edilen 50 gram bağlayıcı AASHTO PP1 standardına uygun olarak her bir numune kabına yerleştirilmektedir. PAV deneyinde bağlayıcı sınıfına göre değişen (90–100 ve 110°C) belirli bir sıcaklıkta numunelere 20 saat süreyle 2070 kPa'lık basınç uygulanmaktadır [88]. Bağlayıcı sınıfına göre değişen deney sıcaklıkları Tablo 4.1'de verilmiştir. Deney aleti ise Şekil 4.4'de görülmektedir.

**Tablo 4.1.** Bağlayıcı sınıfına bağlı olarak PAV deney sıcaklıkları [88]

| 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             | 100–110                  |



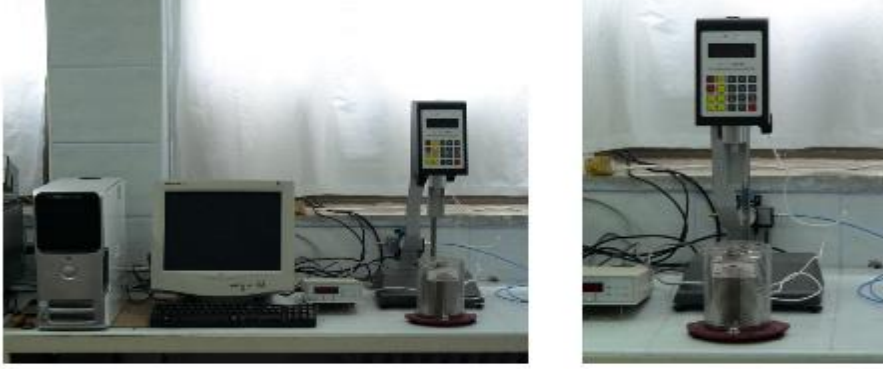
Şekil 4.4. PAV deney aleti

RTFOT ve PAV deneyinden elde edilen numuneler Superpave deneylerinde kullanılarak yaşlandırılmış bağlayıcıların performansları ve şartname kriterlerine uygunlukları tespit edilmektedir.

#### 4.1.2.3. Dönel Viskozimetre (RV) Deneyi

Dönel viskozimetre (RV) deneyi, bitümlü bağlayıcıların yüksek sıcaklıktaki akışkanlık özelliklerini belirlemek amacıyla uygulanmaktadır. Bu amaçla AASHTO TP48 standardına uygun olarak “Brookfield Viskozimetresi” kullanılmaktadır (Şekil 4.5). Bağlayıcıların yüksek sıcaklık viskozite değerleri, pompalanma ve karıştırma sırasında bağlayıcıların yeterince akışkan olup olmadıklarını tespit etmek amacıyla belirlenmektedir. Genellikle orijinal bağlayıcılar üzerinde uygulanan RV deneyinde 135°C’deki viskozite değeri 3 Pa.s’yi (3000 cP) aşmamalıdır [89]. Deney için bağlayıcıdan yaklaşık 30 gr. alınan malzeme, sıcaklığı 150°C’den daha düşük olan etüvde ısıtılarak akışkan hale getirilmektedir. Bu malzemenin yaklaşık 11 gramı numune bölmesine doldurulur. Numune bölmesi, sıcaklığı sabit değere ulaşmış sıcaklık kontrollü kaba yerleştirilir ve 15 dakika sabit sıcaklıkta bekletilerek deney uygulanır. Deneyde bir motor yardımıyla milin düzenli olarak 20 rpm. hızla dönmesi sağlanmaktadır. Yaklaşık olarak eşit viskozite değerlerine erişildikten sonra üç adet okuma yapılarak bulunan üç değerın ortalamasından bağlayıcının viskozitesi elde edilir. BSK’ların karıştırılmasında bitümlü bağlayıcının 170 ± 20 cP, sıkıştırılmasında ise 280 ± 30 cP viskozite değerine sahip olması istenmektedir [88]. Bu viskozite değerlerine karşılık gelen sıcaklık değerleri karıştırma ve sıkıştırma sıcaklığı olarak alınmaktadır. Bu amaçla 135 ve

165°C sıcaklıkta yapılan dönel viskozimetre deneylerinden elde edilen değerler sıcaklık-viskozite grafiğinde yerine konularak karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları elde edilmektedir.



Şekil 4.5. Brookfield viskozimetresi ve sıcaklık sistemi

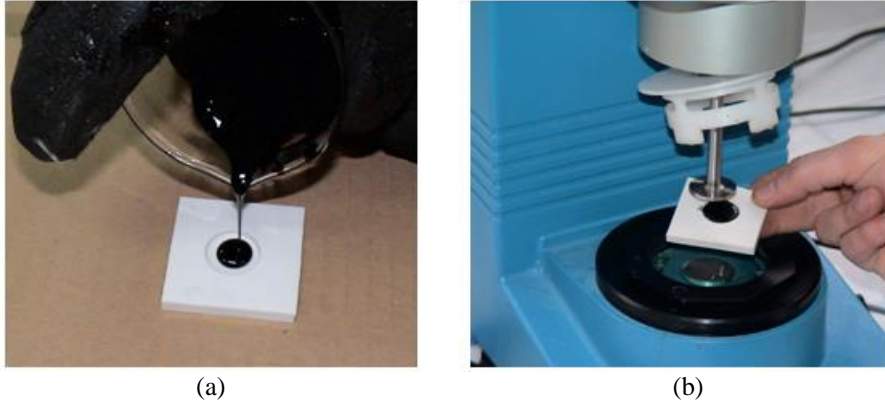
#### 4.1.2.4. Dinamik Kesme Reometresi (DSR) Deneyi

Dinamik kesme reometresi deneyi, bağlayıcıların yorulma ve tekerlek izi oluşumuna karşı dayanımını tespit etmek amacıyla uygulanmaktadır. Bitümlü bağlayıcıların tekerlek izi oluşumuna karşı dayanımlarını belirlemek için işlem görmemiş ve RTFOT yöntemiyle yaşlandırılmış bağlayıcılar kullanılırken, bağlayıcıların yorulma davranışlarını belirlemek için ise PAV yöntemiyle yaşlandırılmış bağlayıcılar kullanılmaktadır. Numune boyutları, tekerlek izi dayanımını tespit etmek için 25 mm çapında ve 1000 mikron yükseklikte, yorulma dayanımının tespiti için ise 8 mm çapında ve 2000 mikron yükseklikte olmalıdır. Deneylerde kullanılan DSR deney aleti Şekil 4.6'da görülmektedir.



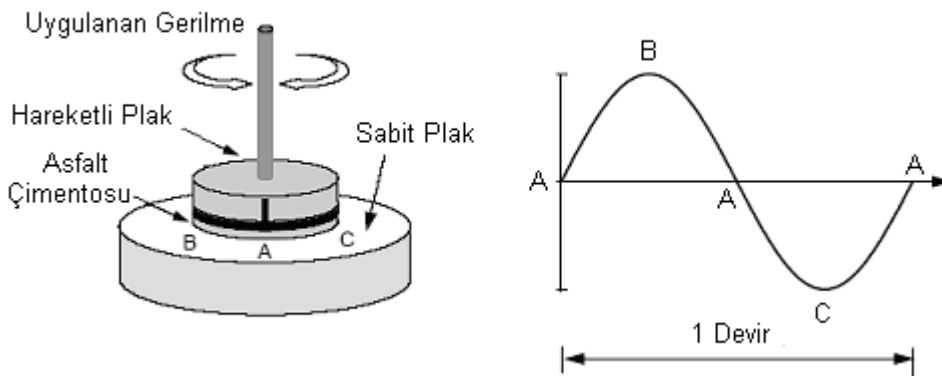
Şekil 4.6. Bohlin DSR II dinamik kesme reometresi

Deneyde bitümlü bağlayıcı doğrudan plaklar üzerine dökülebileceği gibi silikon kalıplar yardımıyla da numune hazırlanabilmektedir. Silikon kalıplarla numune hazırlanışı ve numunenin deney aletine yerleştirilişi Şekil 4.7’de gösterilmektedir.



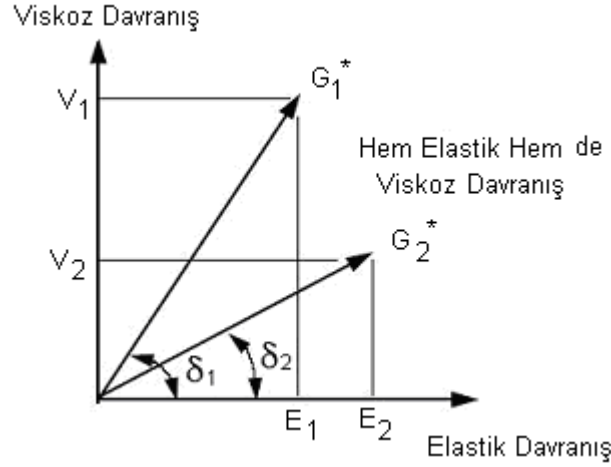
Şekil 4.7. Numunenin silikon kalıba doldurulması (a) ve üst plağa yerleştirilmesi (b)

Deneyde, şekil 4.8’de görüldüğü gibi sabit alt plak ve hareketli üst plak arasında bağlayıcı numunesi yerleştirilmektedir. Hareketli üst plak A noktasından B noktasına gitmekte geri dönerek A noktasına geldikten sonra C noktasına gitmektedir. Daha sonrada tekrar A noktasına ulaşmaktadır. Bu döngüye bir devir denilmektedir ve deney boyunca bu döngü tekrarlanmaktadır. Deneyde dönme frekansı ise yaklaşık 1,59 devir/saniye’dir. Deneyde ortam şartlarını yansıtması amacıyla 10 devir ön koşullandırma yapılmaktadır. Daha sonra 10 devirlik standart deney uygulanmaktadır [88, 90].



Şekil 4.8. DSR deneyinde numunelere uygulanan deformasyon yönleri [88, 90]

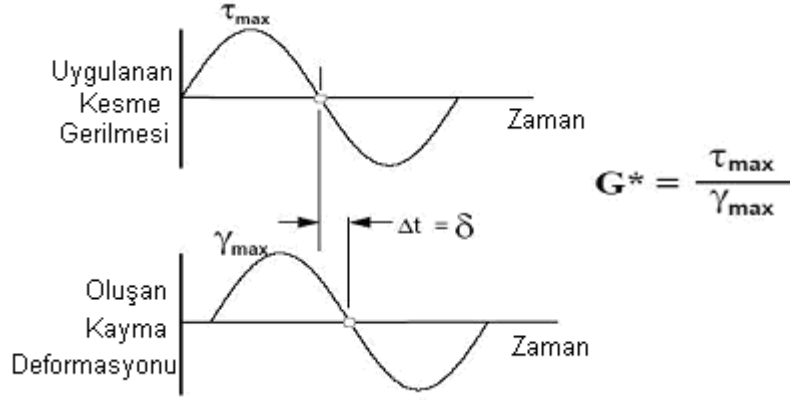
Dinamik kesme reometresi deneyi, asfalt çimentosunun kompleks kesme modülü ( $G^*$ ) ve faz açısını ( $\delta$ ) belirleyerek viskoz ve elastik davranışını karakterize etmektedir.  $G^*$ , tekerrür eden kesme gerilmelerinin oluşturduğu deformasyonlara karşı asfalt çimentosunun gösterdiği toplam direncin göstergesidir. Hem  $G^*$  hem de  $\delta$  değerleri asfalt çimentosunun sahip olduğu ısı ve yükleme hızı ile önemli ölçüde değişmektedir (Şekil 4.9) [88, 90].



Şekil 4.9. Asfalt çimentosunun viskoelastik özelliği [88, 90]

Viskoelastik davranışı gösteren Şekil 4.9'da görüldüğü gibi yatay eksen elastik davranışı (yükleme hızı yüksek ve sıcaklık düşük) ifade ederken dikey eksen ise viskoz davranışı (yükleme hızı düşük ve sıcaklık yüksek) ifade etmektedir. Ancak normal kaplama ısı ve normal yükleme durumlarında asfalt çimentosu hem elastik hem de viskoz davranış sergilemektedir. Asfalt çimentosunun viskoelastik özelliğe sahip olması ve her bir asfalt çimentosunun birbirinden farklı olması nedeniyle 1 ve 2 numaralı asfaltların yük altındaki viskoz ve elastik bileşenleri de birbirinden farklı olmaktadır. Şekilden de anlaşılacağı gibi viskoelastik özellik hem  $G^*$ 'a hem de  $\delta$ 'a bağlıdır. Bu nedenle asfalt çimentosunun viskoelastik özelliği,  $G^*$  ve  $\delta$  birlikte göz önünde tutularak belirlenmelidir. Faz açısı ( $\delta$ ), uygulanan gerilme ile meydana gelen deformasyon arasındaki zaman aralığına ( $\Delta t$ ) eşit olmaktadır. Faz açısı da Şekil 4.10'da gösterilmektedir [88, 90].





Şekil 4.10. Viskoelastik malzemelerin gerilme-deformasyon ilişkisi [88, 90]

AASHTO TP-5 standardına uygun olarak yapılan bu deneyde yorulma ve tekerlek izi oluşumuna karşı dayanım şartname limitleri Tablo 4.2’de verilmiştir [88, 90].

Tablo 4.2. DSR deneyinde kullanılan bağlayıcı türlerine göre şartname limitleri [88, 90]

| Bağlayıcı Türü | Deney Amacı                          | Şartname Limitleri |
|----------------|--------------------------------------|--------------------|
| Orijinal       | Tekerlek izi oluşumuna karşı dayanım | Minimum 1,00 kPa   |
| RTFOT          | Tekerlek izi oluşumuna karşı dayanım | Minimum 2,2 kPa.   |
| PAV            | Yorulmaya karşı dayanım              | Maksimum 5000 kPa  |

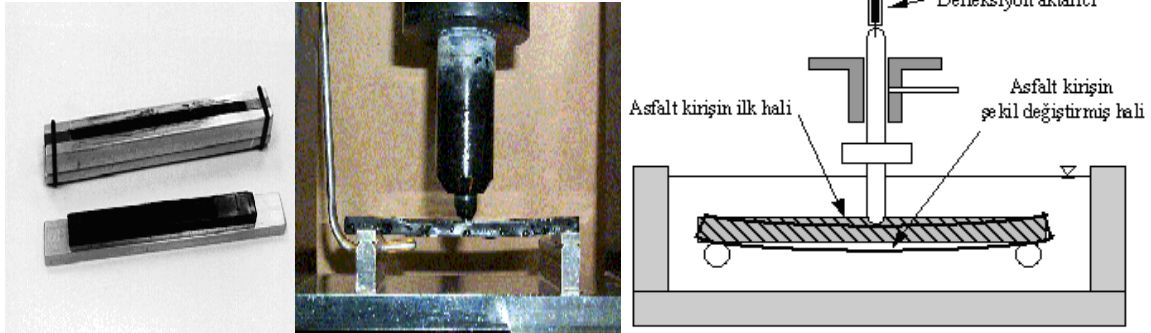
#### 4.1.2.5. Kiriş Eğme Reometresi (BBR) Deneyi

Bitüm, termoplastik özelliğinden dolayı düşük sıcaklıklarda rijit (katı) davranış göstermektedir. Kiriş eğme reometresi (BBR) deneyinin amacı, düşük sıcaklıklarda bitümlü bağlayıcıların rijitlik ve mukavemet özellikleri arasındaki ilişkinin tam olarak belirlenememesinden dolayı belirli bir sıcaklıkta sabit yük altında bağlayıcının ne kadar defleksiyon yapacağını tespit etmektir [88]. PAV deneyinden elde edilen yaşlandırılmış bağlayıcılar bu deneyde kullanılmaktadır. BBR deney aleti Şekil 4.11’de görülmektedir.



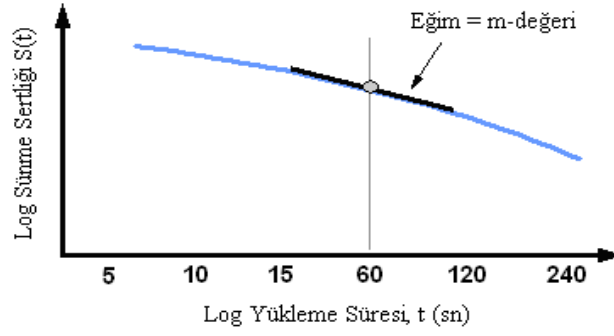
Şekil 4.11. Kiriş eğme reometresi (BBR) deney aleti

Deney boyunca bağlayıcı sınıfına göre asfalt kiriş numunesi, sabit düşük sıcaklık değerinde tutulmaktadır. Deney için 6,35x127x12,7 mm boyutlarındaki kalıplar kullanılmaktadır. AASHTO TP1 standardına uygun olarak yapılan kiriş eğme reometresi deneyinde asfalt kirişin orta noktasından 240 saniye boyunca 980 mN'luk yük etki ettirilmektedir (Şekil 4.12).



Şekil 4.12. BBR deneyi için numune hazırlanması ve deneyin yapılması

Deney sonunda yük ve defleksiyon, bağlayıcının sünme sertliğini ve sünme oranını (m-değeri) tespit etmek amacıyla kullanılmaktadır. Sünme sertliği, numunelerin sabit sünme yüklerine karşı dayanımın bir göstergesiyken, sünme oranı (m-değeri) sünme sertliğindeki değişiklikler ile yükleme süresi arasındaki oranı ifade etmektedir. Yüke ve defleksiyona bağlı olarak sünme sertliği değeri belirlendikten sonra sünme sertlik değerlerinin zamanla değişimini gösteren bir grafik çizilir (Şekil 4.13). Bu grafikte eğriye teğet olan doğrunun 60. saniyedeki eğimi sünme oranını (m-değeri) vermektedir. AASHTO TP1 standardına göre sünme sertlik değerinin maksimum 300 Mpa ve sünme oranı değerinin ise minimum 0,300 olması gerekmektedir.

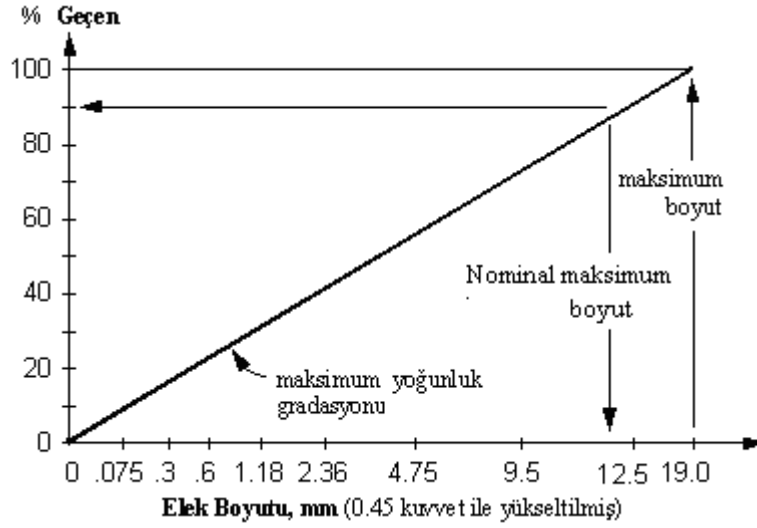


Şekil 4.13. Sünme oranının belirlenmesi

## 4.2. Superpave Yöntemine Göre Bitümlü Sıcak Karışım Tasarımı

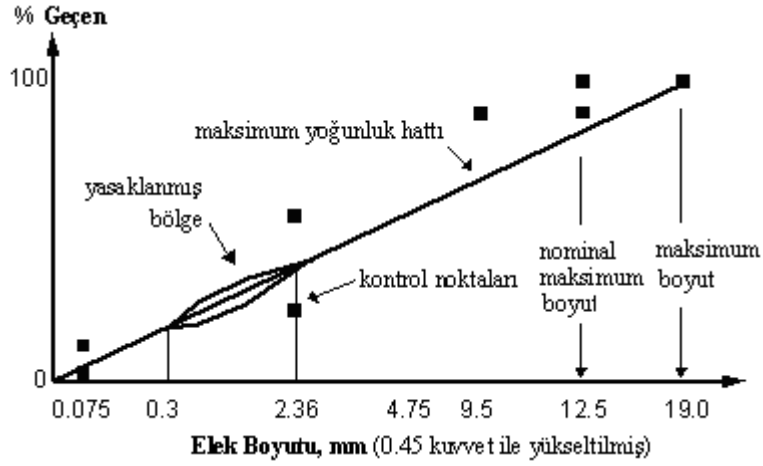
### 4.2.1. Tasarım Agrega Gradasyonu Seçimi

Geleneksel yöntemlerde agrega gradasyon limitleri verilirken yatay ekseninde logaritmik ölçekte elek boyutu, düşey ekseninde ise aritmetik ölçekte % geçen değeri verilerek kümülatif dane dağılımı belirlenmektedir. Superpave yönteminde de geleneksel yöntemden farklı olarak 0,45 kuvvet grafiği kullanılmaktadır. Bu yöntemde ise düşey ekseninde aritmetik olarak % geçen değeri verilirken yatay ekseninde elek açıklığının 0,45. kuvveti alınarak değerler işaretlenmektedir. Burada, 0,45 üstel kuvvet eğrisinin en önemli özelliği, maksimum yoğunluktaki gradasyonu elde etmektir (Şekil 4.14). Bu yoğunluk ise, grafiğin orijininden yani 0,0 noktasından maksimum agrega boyutunun %100 geçtiğini gösteren noktaya çizilen doğru ile elde edilmektedir [1]. Maksimum yoğunluk hattına yakın veya paralel geçen malzemelerin içerisinde yeterli kalınlıkta asfalt film tabakasının oluşmasına izin vermeyecek kadar az boşluk olması nedeniyle, bu tür gradasyona sahip agrega karışımlarının kullanılmasından kaçınılmalıdır.



Şekil 4.14. 19 mm maksimum boyut için maksimum yoğunluk gradasyonu [1]

Superpave yönteminde ayrıca maksimum boyut, nominal maksimum boyut, yasaklanmış bölge ve kontrol noktaları gibi ifadeler yer almaktadır. Nominal maksimum boyut, agrega malzemesinin %10'dan fazlasının üstte kaldığı (veya %90'ının geçtiği) ilk eleğin bir üst elek boyutudur. Maksimum boyut, nominal maksimum boyuttan bir büyük elek boyutudur. Kontrol noktaları, gradasyon eğrisinin geçmek zorunda olduğu sınırları belirlemektedir. Bu sınır noktaları nominal maksimum elek, orta elek (2,36 mm) ve en küçük boyutlu (0,075 mm) eleklerin bulunduğu yerlerde belirlenmiştir. Yasaklanmış bölge ise, bant şeklindeki bir bölgeyi temsil eder ve gradasyon eğrisinin geçmemesi gereken bir bölge olarak tanımlanmaktadır. Yasaklanmış bölge, maksimum yoğunluk hattı üzerinde ve maksimum boyuta bağlı olarak 4,75 mm veya 2,36 mm ile 0,3 mm elekler arasında bir bant şeklindeki bölgedir (Şekil 4.15). Yasaklanmış bölgeden geçen gradasyon, bünyesinde çok fazla kum veya ince malzeme içerdiğinden yapım sırasında sıkıştırma zorluğuna ve sonrasında kalıcı deformasyonlara neden olmaktadır. Yasaklanmış bölge, ince agrega boyutunda gradasyon eğrisinin maksimum yoğunluk hattına yakın ve paralel geçmesini engeller ve bu hattan uzaklaşmayı gerektirir. Çünkü maksimum yoğunluk gradasyonu, genellikle yetersiz agregalar arasındaki boşluk yüzdesi (VMA) sağladığından ve bu boşluklar içerisine yetersiz miktarda asfalt bağlayıcı gireceğinden karışımın durabilitesini de azaltacaktır. Ayrıca bu tip gradasyonlar asfalt içeriğine oldukça duyarlı olup asfalt içeriğindeki çok küçük değişimlerde bile kolayca plastik özellik gösterebilmektedirler. Superpave yöntemi, agrega gradasyonunun yasaklanmış bölgenin altından geçmesini tavsiye etmesinin yanında herhangi bir mecburiyet getirmemektedir. Ancak, karışımın iyi bir performans göstermesi için gradasyonun özellikle yasaklanmış bölgenin altından geçmesi önerilmektedir [1].



Şekil 4.15. 19 mm maksimum boyut için superpave gradasyon limitleri [1, 15, 91]

Superpave yönteminde, Tablo 4.3’de görüldüğü gibi nominal maksimum agrega boyutuna göre tanımlanan beş çeşit agrega karışımı kullanılmaktadır. Ayrıca, bu beş Superpave karışımı için kullanılan sayısal gradasyon limitleri de Tablo 4.4 'de verilmiştir.

Tablo 4.3. Superpave karışım gradasyonları [1, 15, 91]

| Nominal Maksimum Boyut, mm | Maksimum Boyut, mm |
|----------------------------|--------------------|
| 37,5                       | 50                 |
| 25                         | 37,5               |
| 19                         | 25                 |
| 12,5                       | 19                 |
| 9,5                        | 12,5               |

Tablo 4.4. Superpave karışım gradasyon limitleri [1, 15, 91]

| Standart Elek (mm) | Yüzde Geçen Kriteri (Kontrol Noktaları) |           |           |           |           |
|--------------------|---|-----------|-----------|-----------|-----------|
|                    | Nominal Maksimum Elek Boyutu            |           |           |           |           |
|                    | 9,5 mm                                  | 12,5 mm   | 19 mm     | 25 mm     | 37,5 mm   |
| 50,0               |   |           |           |           | 100       |
| 37,5               |   |           |           | 100       | 90–100    |
| 25,0               |   |           | 100       | 90–100    |           |
| 19,0               |   | 100       | 90–100    |           |           |
| 12,5               | 100                                     | 90–100    |           |           |           |
| 9,5                | 90–100                                  |           |           |           |           |
| 2,36               | 32–67                                   | 28–58     | 23–49     | 19–45     | 15–41     |
| 0,075              | 2,0–10,0                                | 2,0–10,0  | 2,0–8,0   | 1,0–7,0   | 0,0–6,0   |
| Elek               | Tavsiye Edilen Yasaklanmış Bölge        |           |           |           |           |
| 4,75               |   |           |           | 39,5      | 34,7      |
| 2,36               | 47,2                                    | 39,1      | 34,6      | 26,8–30,8 | 23,3–27,3 |
| 1,18               | 31,6–37,6                               | 25,6–31,6 | 22,3–28,3 | 18,1–24,1 | 15,5–21,5 |
| 0,6                | 23,5–27,5                               | 19,1–23,1 | 16,7–20,7 | 13,6–17,6 | 11,7–15,7 |
| 0,3                | 18,7                                    | 15,5      | 13,7      | 11,4      | 10,0      |

#### 4.2.2. Superpave Hacimsel Karışım Tasarımı

Superpave tasarım metodu, dikkate alınan trafik değerine göre Seviye 1, Seviye 2 ve Seviye 3 olmak üzere üç farklı prosedürde uygulanmaktadır. En düşük kriterlere sahip olan Seviye 1 tasarım yönteminde nem hasarına karşı dayanıklılık deneyi ile hacimsel karışım tasarımı yer almaktadır. Hacimsel karışım tasarımı aynı zamanda diğer iki seviyeye göre tasarımda temel prosedür olarak tanımlanmaktadır. Karışım tasarım işlemleri, Superpave agrega gradasyon kriterlerini sağlayan farklı agrega deneme karışımlarını hazırlayarak, bu karışımları bitümlü bağlayıcı ile karıştırarak kısa dönem yaşlandırmaya tabi tutmak, yaşlanmış numuneleri sıkıştırmak ve agrega deneme karışımlarının hacimsel özelliklerini analiz ederek en iyi agrega deneme karışımını tasarım agrega gradasyonu olarak seçmek ve seçilen tasarım agrega gradasyonu için gerekli olan tasarım asfalt içeriğini belirlemek amacıyla çeşitli asfalt içeriklerinde karışım numunesi hazırlayarak sıkıştırmaktır [50]. Hacimsel tasarımda agrega ve bitümün özgül ağırlıklarının doğru bir şekilde belirlenmesi büyük öneme sahiptir.

Agrega özgül ağırlıkları; hacim ( $G_{sb}$ ), efektif ( $G_{se}$ ) ve zahiri özgül ağırlık ( $G_{sa}$ ) olmak üzere üçe ayrılmaktadır. Hacim özgül ağırlık; standart bir sıcaklıkta, birim hacimdeki malzemenin (bütün boşluklar dâhil) havadaki ağırlığının, standart sıcaklıkta ve aynı hacimdeki damıtılmış suyun ağırlığına oranı olarak tarif edilir. Efektif özgül ağırlık; standart bir sıcaklıkta, birim hacimdeki malzemenin (bitümlü bağlayıcının giremediği fakat suyun nüfuz edebildiği boşluklar dâhil) havadaki ağırlığının, standart sıcaklıkta ve aynı hacimdeki damıtılmış suyun ağırlığına oranıdır. Zahiri özgül ağırlık ise standart bir sıcaklıkta, birim hacimdeki malzemenin (boşluk içermeyen) havadaki ağırlığının, standart sıcaklıkta ve aynı hacimdeki damıtılmış suyun ağırlığına oranıdır. Özgül ağırlıkların değişiminde dikkate alınan boşluklar etkili olmaktadır. Yani hacim değerleri arttıkça özgül ağırlık değerlerinin azaldığı söylenebilir. Özgül ağırlık değerleri arasında dikkate alınan hacim değerlerine bağlı olarak  $G_{sa} > G_{se} > G_{sb}$  şeklinde bir ilişki bulunmaktadır.

Superpave yöntemi hacimsel BSK tasarımında iki farklı bitümlü sıcak karışım özgül ağırlık değeri kullanılmaktadır. Maksimum teorik özgül ağırlık ( $G_{mm}$ ); Standart bir sıcaklıkta, birim hacimdeki asfalt ve agregadan oluşan karışımın (boşluksuz) havadaki ağırlığının, standart sıcaklıkta ve aynı hacimdeki damıtılmış suyun ağırlığına oranıdır. Maksimum teorik özgül ağırlık AASHTO T209 ile belirlenmekte ve asfalt betonu karışımındaki hava boşluğu miktarının ve yapım süresince kaplama sıkıştırması için hedef yoğunluk değerinin hesaplanmasını sağlamaktadır [92]. Hacim özgül ağırlık ( $G_{mb}$ ) ise standart bir sıcaklıkta,

sıkışmış asfalt ve agregası karışımının (boşluklu) birim hacminin standart sıcaklıkta ve aynı hacimdeki damıtılmış suyun ağırlığına oranıdır.

Tasarım yönteminde öncelikle nominal maksimum elek boyutlarına göre gradasyon kontrol noktalarına uygun ve yasaklanmış bölgenin dışında olacak şekilde üç farklı gradasyon seçilmektedir. Seçilen numune karışımlarındaki, kaba ve ince agregası ile fillerin özgül ağırlıkları tespit edilerek, her bir numune agregası karışımının hacim ( $G_{sb}$ ) ve zahiri ( $G_{sa}$ ) özgül ağırlığı Formül 4.5 'ten yararlanılarak hesaplanmaktadır.

$$G_{sb}, G_{sa} = \frac{P_1 + P_2 + \dots + P_N}{\frac{P_1}{G_1} + \frac{P_2}{G_2} + \dots + \frac{P_N}{G_N}} \quad (4.5)$$

$P_1, P_2, P_N$ : Her bir agreganın ağırlıkça yüzdesi,

$G_1, G_2, G_N$ : Her bir agreganın hacim ve zahiri özgül ağırlığı.

Agregası karışımının efektif özgül ağırlığı karışımın efektif özgül ağırlığından faydalanarak belirlenebilmektedir. Fakat tasarım aşamasında öncelikle Formül 4.6 ile yakın bir değer belirlenerek kullanılmaktadır. Bu bağıntıda, su absorpsiyonuna bağılı olarak değişen katsayı değeri 0,8 olarak alınmıştır. Absorpsiyonu yüksek olan agregalarda bu katsayı 0,6 veya 0,5'e kadar azaltılabilir.

$$G_{se} = G_{sb} + 0,8 \times (G_{sa} - G_{sb}) \quad (4.6)$$

Agregası tarafından absorbe edilecek bitümlü bağlayıcı hacmi ( $V_{ba}$ ) Formül 4.7 ile hesaplanmaktadır.

$$V_{ba} = \frac{P_s \times (1 - V_a)}{\left(\frac{P_b}{G_b} + \frac{P_s}{G_{se}}\right)} \times \left(\frac{1}{G_{sb}} - \frac{1}{G_{se}}\right) \quad (4.7)$$

$V_{ba}$ : Absorbe edilen asfalt bağlayıcı hacmi (karışıma göre,  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ),

$P_b$ : Bağlayıcı yüzdesi,

$P_s$ : Agregası yüzdesi,

$G_b$ : Bağlayıcının özgül ağırlığı,

$V_a$ : Hava boşluğu hacmi.

Her üç deneme karışımının efektif bağlayıcı hacmi (Vbe) ise Formül 4.8 ile belirlenmektedir.

$$Vbe = 0,176 - 0,0675 \times \text{Log}(Sn) \quad (4.8)$$

Vbe: Efektif bağlayıcı hacmi (karışıma göre,  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ),

Sn: Agregada karışımındaki nominal maksimum elek boyutu (mm).

Başlangıç deneme asfalt bağlayıcı içeriği (Pbi) aşağıdaki bağıntılar ile belirlenmektedir (Formül 4.9 , 4.10).

$$Ws = \frac{Ps \times (1 - Va)}{\left(\frac{Pb}{Gb} + \frac{Ps}{Gse}\right)} \quad (4.9)$$

$$Pbi = \frac{Gb \times (Vbe + Vba)}{(Gb \times (Vbe + Vba)) + Ws} \times 100 \quad (4.10)$$

Pbi: Karışım ağırlığına göre bağlayıcı yüzdesi,

Ws: Agreganın ağırlığı (gr).

Karışım ağırlığına göre bulunan bağlayıcı yüzdesi (Pbi) yardımıyla, toplam agregada ağırlığına göre alınacak bağlayıcı miktarı (Wb) aşağıdaki Formül 4.11 ile hesaplanmaktadır. Dönel viskozimetre deneyinden elde edilen karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları bitümlü sıcak karışım numunelerinin hazırlanmasında kullanılmalıdır.

$$Wb = \frac{Ws \times Pbi}{100 - Pbi} \quad (4.11)$$

Deneme karışımlarının maksimum teorik özgül ağırlıklarının (Gmm) tespit edilmesi amacıyla her bir deneme karışımı için başlangıç deneme bitüm içeriklerinde en az iki adet olmak üzere toplam 6 adet karışım numunesi hazırlanmaktadır. Karışım, düz ve yayvan bir tepsiye metrekareye 21–22 kg düşecek kalınlıkta yerleştirilmiş ve önceden ısıtılmış  $135^\circ\text{C}$ 'deki etüve konularak 4 saat boyunca kısa dönem yaşlandırma işlemine maruz bırakılmaktadır. Hazırlanan ve yaşlandırma işleminden sonra soğumaya bırakılan karışım numunelerinin maksimum teorik özgül ağırlıkları (Gmm) AASHTO T209 standardına göre tespit edilmektedir (Formül 4.12).



$$Gmm = \frac{C-A}{(B-A)-(D-C)} \quad (4.12)$$

A: Piknometre ağırlığı (gr)

B: Piknometre +Su ağırlığı (gr)

C: Piknometre +Numune ağırlığı (gr)

D: Piknometre +Numune+Su ağırlığı (gr)

Belirlenen Gmm değerlerinden faydalanılarak hesapla agrega karışımının efektif özgül ağırlığı (Gse) değerleri bulunmaktadır (Formül 4.13). Çalışmanın geri kalan kısmında hesapla belirlenen bu Gse değerleri kullanılmaktadır.

$$Gse \text{ (hesap)} = \frac{100 - Pbi}{\left(\frac{100}{Gmm} - \frac{Pbi}{Gb}\right)} \quad (4.13)$$

Daha sonra deneme karışımlarının sıkıştırılması amacıyla her bir deneme karışımı için iki olmak üzere toplam 6 adet asfalt karışım numunesi hazırlanmaktadır. Karışım, düz ve yayvan bir tepsiye metrekareye 21–22 kg düşecek kalınlıkta yerleştirilmekte ve önceden ısıtılmış 135°C'deki etüve konularak 4 saat boyunca kısa dönem yaşlandırma işlemine tabi tutulmaktadır. Karışım numunelerinin yaşlandırma işleminden sonra sıkıştırma sıcaklığına ulaşması için numuneler 30 dakika etüvede bekletilmektedir. Bu sırada, ilk numunenin sıkıştırılmasından yaklaşık 45–60 dakika önce, sıkıştırma kalıbı, alt ve üst plakalar sıkıştırma sıcaklığına ayarlanmış bir etüve konulmalı ve yoğurmalı pres hazırlanmaktadır. Sıkıştırma enerjisinin bir fonksiyonu olan yoğurma sayısı; uygulanan yoldan geçmesi planlanan eşdeğer standart tek dingil yükü (ETDY) sayısı ve yolun sınıfına bağlı olarak AASHTO TP4 standardına göre Tablo 4.5'te görülmektedir.

**Tablo 4.5.** Taşıt sayısına göre sıkıştırma parametreleri [93, 94]

| Tasarım Trafik<br>(ETDY), milyon | Sıkıştırma Parametreleri |      |       | Tipik Karayolu Uygulamaları   |
|----------------------------------|--------------------------|------|-------|---|
|                                  | Nini                     | Ndes | Nmaks |   |
| < 0,3                            | 6                        | 50   | 75    | Çok az trafik kapasiteli yollar   |
| 0,3–3                            | 7                        | 75   | 115   | Orta trafikli şehir yolları   |
| 3–30                             | 8                        | 100  | 160   | Yüksek trafikli şehir yolları ile çift yönlü,<br>çok şeritli yollar             |
| > 30                             | 9                        | 125  | 205   | Ağır kamyon trafiğine maruz kalan çok<br>şeritli, ağır trafik yoğunluklu yollar |

Superpave yönteminde sıkıştırma enerjisi, yoğurma sayısının (Ndes) bir fonksiyonu olarak alınmaktadır. Nini sayısı karışımın sıkışabilirliğini, Nmaks sayısı ise karışımın ulaşabileceği maksimum yoğunluğu tespit etmek için kullanılmaktadır. Deney için sıkıştırma sıcaklığına getirilerek hazırlanan karışımlar kalıba yerleştirilmekte ve sıkıştırma işlemine başlanmaktadır. Sıkıştırma işlemi esnasında, karışımların yoğurma sayılarındaki yükseklikleri ölçülmekte ve istenen yoğurma sayısı (Ndes) tamamlanıncaya kadar numuneler sıkıştırılmaktadır. Sıkışan numuneler zarar görmeden kalıptan çıkartılarak soğumaya bırakılmakta ve bu numunelerin hacim özgül ağırlığı (Gmb(ölçülen)), AASHTO T166 standardına göre aşağıdaki formül ile tespit edilmektedir (Formül 4.14).

$$Gmb(\text{ölçülen}) = A/(B-C) \quad (4.14)$$

A: Numunenin kuru ağırlığı (gr)

B: Doygun yüzey kuru ağırlık (gr)

C: Sudaki ağırlık (gr)

Karışımların hava boşluklarının %4 olması tasarım esnasında bütün trafik düzeyleri için istenen bir durumdur. Sıkıştırılmış karışımdaki hava boşluklarının hacimce yüzdesi aşağıdaki Formül 4.15 ile belirlenmektedir.

$$Va = 100 \times \frac{Gmm - Gmb}{Gmm} \quad (4.15)$$

Va: Sıkıştırılmış bir karışımda toplam hacmin yüzdesi olarak hava boşlukları,

Gmm: Asfalt karışımın maksimum özgül ağırlığı (hesaplanmış veya deneyle bulunmuş),

Gmb: Sıkıştırılmış karışımın hacim özgül ağırlığı.

Mineral agregalar arasındaki boşluklar (VMA); efektif asfalt içeriği ve hava boşlukları içeren sıkıştırılmış bir asfalt karışımında, agrega taneleri arasındaki granüler boşluklar olarak tanımlanmakta ve karışımın toplam hacminin yüzdesi olarak ifade edilmektedir. VMA, agreganın hacim özgül ağırlığına göre hesaplanarak sıkıştırılmış asfalt karışımın hacim özgül ağırlığının yüzdesi olarak ifade edilmektedir. Bu nedenle VMA, sıkıştırılmış asfalt karışımın toplam hacminden, hacim özgül ağırlığınca belirlenmiş agrega hacminin çıkartılması ile hesaplanmaktadır. VMA yüzdesi, karışım ağırlığı ve agrega ağırlığının yüzdesi olarak aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır [15]. Toplam karışımın ağırlıkça yüzdesi olarak agrega içeriği göz önünde bulundurularak Formül 4.16 ile, toplam agreganın ağırlıkça yüzdesi olarak

asfalt içeriğinden yola çıkılarak ise Formül 4.17 ile VMA hesaplanmaktadır. Superpave yönteminde, agrega boyutuna bağlı olarak %4 tasarım hava boşluğunda tavsiye edilen minimum VMA değerleri Tablo 4.6’da verilmiştir.

$$VMA = 100 - \frac{Gmb \times Ps}{Gsb} \quad (4.16)$$

VMA: Karışımın toplam hacminin yüzdesi olarak mineral agregadaki boşluklar,

Gsb: Agrega karışımının hacim özgül ağırlığı,

Gmb: Sıkıştırılmış karışımın hacim özgül ağırlığı (AASHTO T166) [95]

Ps: Toplam karışımın ağırlıkça yüzdesi olarak agrega içeriği.

$$VMA = 100 - \frac{Gmb}{Gsb} \times \frac{100}{100 + Pb} \times 100 \quad (4.17)$$

Pb: Toplam agreganın ağırlıkça yüzdesi olarak asfalt içeriği.

**Tablo 4.6.** Superpave VMA gereksinimleri [15]

| Nominal Maksimum Agrega Boyutu, mm | Minimum VMA, % |
|------------------------------------|----------------|
| 9,5                                | 15,0           |
| 12,5                               | 14,0           |
| 19                                 | 13,0           |
| 25                                 | 12,0           |
| 37,5                               | 11,0           |

Agrega tarafından absorbe edilmiş bitümün dışındaki karışımda bulunan bitüm içeriğini ifade eden bitümle dolu mineral agregadaki boşluk yüzdesi (VFA), aşağıdaki Formül 4.18 ile belirlenmektedir [15]. Superpave yönteminde, trafik düzeyine bağlı olarak %4 tasarım hava boşluğu yüzdesinde kabul edilebilir VFA değer aralığı Tablo 4.7’de verilmiştir.

$$VFA = 100 \times \frac{VMA - Va}{VMA} \quad (4.18)$$

VFA: VMA’nın yüzdesi olarak bitüm ile dolu boşluklar,

VMA: Karışımın toplam hacminin yüzdesi olarak mineral agregadaki boşluklar,

Va: Sıkıştırılmış bir karışımda toplam hacmin yüzdesi olarak hava boşlukları.

**Tablo 4.7.** Superpave VFA gereksinimleri [15]

| Tasarım Trafik (ETDY), milyon | Tasarım VFA, % |
|-------------------------------|----------------|
| <0,3                          | 70–80          |
| 0,3–3                         | 65–78          |
| 3–10                          | 65–75          |
| 10–30                         | 65–75          |
| ≥30                           | 65–75          |

#### 4.2.3. Deneme Karışımlarının Değerlendirilmesi

Yoğurmalı pres ile yapılan sıkıştırma sırasında her dönüş sonrası numune yüksekliği cihazda bulunan sensörler yardımıyla ölçülerek yazılım tarafından kaydedilmektedir. Sıkıştırılmış numunenin hacim özgül ağırlığı (Gmb) numune yüksekliğinden yola çıkılarak belirlenebilmektedir. Herhangi bir yoğurma değeri için hesaplanan tahmini hacim özgül ağırlık değeri olan Gmb(tahmini), karışım ağırlığının numunenin hacmine bölünmesi ile elde edilmektedir (Formül 4.19, 4.20).

$$Gmb(tahmini) = \frac{(Wm / Vmx)}{\gamma_{su}} \quad (4.19)$$

Gmb(tahmini) : Numunenin sıkıştırma sırasındaki hesaplanan tahmini hacim özgül ağırlığı,

Wm: Numunenin ağırlığı (gr),

$\gamma_{su}$ : Suyun yoğunluğu (1 gr/cm<sup>3</sup>),

Vmx: Numunenin hesapla bulunan hacmi (cm<sup>3</sup>).

$$Vmx = \frac{\pi d^2 hx}{4} \times 0.001 \text{cm}^3 / \text{mm}^3 \quad (4.20)$$

d: Kalıbın çapı (100 mm veya 150 mm),

hx: Sıkıştırma esnasında numunenin yüksekliği (mm),

Hesaplamalarda silindir geometriye sahip sıkıştırılmış numunelerin kenarlarının tam olarak düzgün ve boşluksuz olduğu var sayılmakta ancak gerçekte boşluklar nedeniyle daha düşük hacimli bir numune elde edilmektedir. Bu nedenle hesaplanan tahmini hacim özgül ağırlığı

(Gmb(tahmini)) bir düzeltme faktörüyle (C) çarpılarak düzeltilmiş hacim özgül ağırlığı (Gmb(düzeltilmiş)) elde edilmektedir (Formül 4.21 , 4.22).

$$C = \frac{Gmb(\text{ölçülen})}{Gmb(\text{tahmini})} \quad (4.21)$$

$$Gmb(\text{düzeltilmiş}) = C \times Gmb(\text{tahmini}) \quad (4.22)$$

C: Düzeltme faktörü,

Gmb(ölçülen) : Sıkışmış numunenin ölçülen hacim özgül ağırlığı,

Gmb(tahmini) : Sıkışmış numunenin hesaplanan tahmini hacim özgül ağırlığı.

Gmb(düzeltilmiş): Herhangi bir yoğurma için düzeltilmiş hacim özgül ağırlığı.

Düzeltilmiş maksimum teorik özgül ağırlık yüzdesi (%Gmm) değeri, düzeltilmiş hacim özgül ağırlığın (Gmb(düzeltilmiş)), ölçülen teorik maksimum özgül ağırlığına (Gmm(ölçülen)) oranlanması ile bulunmaktadır.

Superpave hacimsel tasarım kriterleri olan VMA, VFA ve filler oranı, tasarım yoğurma sayısı olan Ndes'de karışımın % 4'lük hava boşluğu içeriğine sahip olması esasına dayanmaktadır. Superpave karışım tasarım yöntemi ayrıca Nmaks, Ndes ve Nini yoğurma sayılarında da karışım yoğunluğu için kriterler içermektedir. Tasarım yoğurma sayısındaki (Ndes) hava boşluğu yüzdesi (Va) ve mineral agregadaki boşluk yüzdesi (% VMA) Formül 4.23 ve 4.24 ile belirlenmektedir.

$$Va = 100 - \%Gmm@Ndes \quad (4.23)$$

Va: Toplam hacmin yüzdesi olarak Ndes'deki hava boşluğu,

%Gmm@Ndes: Ndes'deki maksimum teorik ağırlık yüzdesi.

$$\%VMA = 100 - \left( \frac{\%Gmm @ Ndes \times Gmm \times Ps}{Gsb} \right) \quad (4.24)$$

%VMA: Karışımın toplam hacminin yüzdesi olarak mineral agregadaki boşluklar,

%Gmm@Ndes: Ndes'deki maksimum teorik ağırlık yüzdesi,

Gmm: Maksimum teorik özgül ağırlık,

Gsb: Toplam agreganın hacim özgül ağırlığı,

Ps: Toplam karışımın ağırlıkça yüzdesi olarak agreganın içeriği (cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>).

Bu kısma kadar deneme bitüm içeriğinde hazırlanan karışımların hacimsel özellikleri değerlendirilmektedir. Hava boşluğunun %4 olması hacimsel tasarımda istenen bir durumdur. Ancak başlangıç deneme bitüm içeriğinde genellikle %4 boşluk oranı yakalanamamaktadır. Bu nedenle hesaplamayla tasarım yoğurma sayısında (Ndes) %4 boşluk oranını verecek tahmini bitüm içeriği Formül 4.25 yardımıyla belirlenmektedir.

$$Pb(\text{tahmini}) = Pbi - (0,4 \times (4 - Va)) \quad (4.25)$$

Pb(tahmini) : Karışım ağırlığının yüzdesi olarak tahmini asfalt içeriği,

Pbi: Karışım ağırlığının yüzdesi olarak deneme (başlangıç) asfalt içeriği,

Va: Tasarım yoğurma sayısındaki (Ndes) hava boşluğu yüzdesi (deneme).

Deneme bitüm içeriğinde hazırlanan numunelerin hacimsel özelliklerinden yola çıkarak karışımların tasarım yoğurma sayısında (Ndes) ve %4 hava boşluğuna sahip olması durumundaki hacimsel özellikleri aşağıdaki bağıntılar yardımıyla belirlenmektedir (Formül 4.26 , 4.27 , 4.28 , 4.29).

$$\%VMA(\text{tahmini}) = \%VMA(\text{başlangıç}) + C \times (4 - Va) \quad (4.26)$$

%VMA(başlangıç) : Deneme asfalt içeriğindeki karışımın agrega boşlukları yüzdesi,

C: Sabit katsayı, hava boşluğu yüzdesi % 4'den az ise 0,1; yüksek ise 0,2 alınır.

$$\%VFA(\text{tahmini}) = 100 \times \frac{(\%VMA(\text{tahmini}) - 4,0)}{\%VMA(\text{tahmini})} \quad (4.27)$$

$$\%Gmm(\text{tahmini})@Nini = \%Gmm(\text{deneme})@Nini - (4,0 - Va) \quad (4.28)$$

$$\%Gmm(\text{tahmini})@Nmaks = \%Gmm(\text{deneme})@Nmaks - (4,0 - Va) \quad (4.29)$$

Filler oranı (DP) karışımında kullanılan 0,075 mm'lik (No. 200) elekten geçen filler malzemesinin agrega karışımındaki ağırlıkça yüzdesinin ( $P_{0,075}$ ), toplam karışım ağırlığının yüzdesi olarak hesaplanan efektif asfalt içeriğine ( $Pbe(\text{tahmini})$ ) oranlanması ile hesaplanmaktadır. Bir karışımındaki efektif asfalt bağlayıcı içeriği aşağıdaki bağıntı ile hesaplanmaktadır (Formül 4.30). Filler oranı ise Formül 4.31 ile belirlenmektedir.

$$Pbe(\text{tahmini}) = Pb(\text{tahmini}) - (Ps \times Gb) \times \left( \frac{Gse - Gsb}{Gse \times Gsb} \right) \quad (4.30)$$

Pbe(tahmini): Toplam karışım ağırlığının yüzdesi olarak efektif asfalt içeriği,

Pb(tahmini) : Toplam karışım ağırlığının yüzdesi olarak tahmini asfalt içeriği,

Ps: Toplam karışım ağırlığının yüzdesi olarak agrega içeriği,

Gb: Asfaltın özgül ağırlığı,

Gse: Agreganın efektif özgül ağırlığı,

Gsb: Agreganın hacim özgül ağırlığı.

$$DP = \frac{P_{0.075}}{P_{be(tahmini)}} \quad (4.31)$$

Başlangıçta belirlenen üç farklı deneme agrega gradasyonu ile başlangıç asfalt içeriklerinde hazırlanan karışımların yukarıda ifade edilen tahmini değerleri hesaplandıktan sonra, bu değerler aşağıdaki Tablo 4.8'te verilen şartname kriterleri ile ayrı ayrı karşılaştırılmaktadır. Bu karşılaştırma sonucunda tasarım kriterlerine en uygun olan karışım, tasarım agrega gradasyonu olarak seçilmektedir. Seçilen üç gradasyonun da kriterleri sağlamaması durumunda yeniden farklı deneme agrega gradasyonları belirlenerek bütün işlemler tekrarlanmaktadır.

**Tablo 4.8.** Superpave hacimsel karışım tasarım kriterleri [15]

| Tasarım Trafiği (ETDY), milyon | Gerekli Yoğunluk (%Gmm) |      |       | Mineral Agregadaki Boşluk (VMA), min % |      |      |      |      | Asfalt ile Dolu Boşluk (VFA), min % | Filler-Asfalt Oranı (DP) |
|--------------------------------|-------------------------|------|-------|--|------|------|------|------|-------------------------------------|--------------------------|
|                                | Nini                    | Ndes | Nmaks | Nominal Maksimum Agregada Boyutu (mm)  |      |      |      |      |                                     |                          |
|                                |                         |      |       | 37,5                                   | 25,0 | 19,0 | 12,5 | 9,50 |                                     |                          |
| <0,3                           | ≤91,5                   | 96,0 | ≤98,0 | 11,0                                   | 12,0 | 13,0 | 14,0 | 15,0 | 70–80                               | 0,6–1,2*                 |
| 0,3–3                          | ≤90,5                   |      |       |  |      |      |      |      | 65–78                               |                          |
| 3–10                           | ≤89,0                   |      |       |  |      |      |      |      | 65–75                               |                          |
| 10–30                          |                         |      |       |  |      |      |      |      |                                     |                          |
| ≥30                            |                         |      |       |  |      |      |      |      |                                     |                          |

\* : Agregada gradasyonu yasak bölgenin altından geçiyorsa 0,8–1,6 alınmalıdır.

#### 4.2.4. Bitümlü Sıcak Karışımların Tasarım Asfalt Bağlayıcı İçeriklerinin Tespit Edilmesi

Hazırlanan deneme agrega karışımlarından tasarım agrega gradasyonu seçildikten sonra, kabul edilen deneme karışımının tahmini asfalt içeriğinde, tahmini asfalt içeriğinin %0,5 ve %1,0 üstündeki yüzdelerde ayrıca tahmini asfalt içeriğinin %0,5 altında olmak üzere en az dört ayrı asfalt içeriğinde, her asfalt içeriği için en az iki numune olmak üzere toplam 8 bitümlü sıcak karışım numunesi hazırlanmaktadır. Bu dört asfalt içeriği, Superpave karışım

tasarım yöntemi için istenen minimum gereksinimdir. Hazırlanan BSK numuneleri kısa dönem yaşlandırma işlemine tabi tutulduktan sonra önceden belirtildiği şekilde sıkıştırma sıcaklıklarında yoğurmalı pres ile tasarım yoğurma sayısında ( $N_{des}$ ) sıkıştırılmaktadır. Yukarıda açıklandığı şekilde hava boşluğu yüzdesi ( $V_a$ ), agregalar arası boşluk yüzdesi (VMA), asfaltla dolu boşluk yüzdesi (VFA), filler oranı (DP),  $\%G_{mm}@N_{ini.}$ ,  $\%G_{mm}@N_{des.}$  değerleri belirlenmekte ve bu değerler ile bitüm içeriği grafikleri çizilmektedir. Hava boşluğu yüzdesi ( $V_a$ ), bitüm içeriği grafiğinden %4 boşluğa tekabül eden bitüm içeriği, tasarım bitüm içeriği olarak seçilmektedir. Diğer grafiklerde bu bitüm içeriğine karşı gelen değerler alınarak Tablo 4.13'deki değerlerle karşılaştırılmakta ve uygun olup olmadığı tespit edilmektedir. Ayrıca son olarak, tespit edilen tasarım asfalt içeriğinde iki karışım numunesi hazırlanarak maksimum yoğurma sayısında ( $N_{maks}$ ) sıkıştırılmakta ve yoğunluk değerleri şartname kriterleri ile karşılaştırılmaktadır.

#### **4.2.5. Marshall Stabilite ve Akma Deneyi**

Tez çalışmasında BSK numunelere uygulanan Marshall stabilite ve akma deneyi TS EN 12697-34 standardına göre yapılmıştır. Standartta stabilite; deformasyona karşı maksimum dayanım olarak, akma ise maksimum yüke ulaşıldığı anda numunede meydana gelen deformasyon olarak tanımlanmaktadır [96]. Bu Standarda göre öncelikle sıkıştırılmış ve soğumuş numunelerin yükseklikleri ölçülerek kaydedilmektedir. Daha sonra numuneler  $60 \pm 1^\circ\text{C}$  sıcaklığa sahip su banyosunda 40 ile 60 dakika arasında bekletilmektedir. Kıрма çenesi ise  $60 \pm 1^\circ\text{C}$  sıcaklıktaki suda 30 dakika veya  $60 \pm 1^\circ\text{C}$  sıcaklıktaki etüvde 1 saat bekletilmelidir. Bu sürenin sonunda numune sudan çıkarılarak kıрма çenesine ortalanacak şekilde yerleştirilmektedir. Çenenin alt ve üst parçalarına Numunenin tam olarak temas ettiği kontrol edilmelidir. İçinde numune bulunan kıрма çenesi Marshall stabilite aletine yerleştirilerek numuneye  $50 \pm 2$  mm/dakika hızla yükleme yapılmaktadır. Marshall deney düzeneği Şekil 4.16'da görülmektedir.





**Şekil 4.16.** Marshall stabilite ve akma aleti

Deneyde, maksimum yük ve maksimum yük sırasındaki deformasyon değerleri kaydedilmektedir. Bu deney numunenin sudan çıkmasından itibaren 40 sn içerisinde bitirilmelidir. Deneyde standart numune yüksekliğinin 63,5 mm. olduğu kabul edilmektedir. Farklı yüksekliklere sahip numuneler için stabilite düzeltme katsayıları aşağıdaki bağıntı yardımıyla tespit edilmektedir (Formül 4.32).

$$c = 5,24 \times e^{(-0,0258 \times h)} \quad (4.32)$$

Burada c, düzeltme katsayısı, h ise mm olarak numune yüksekliğidir. Elde edilen stabilite ve akma değerlerinin ortalaması alınarak stabilite ve akma değerleri belirlenmektedir. Stabilite ortalamasından %15 farklı stabilite değerine sahip olan numuneler ve akma ortalamasından %20 farklı akma değerine sahip numuneler değerlendirmeden çıkarılmaktadır. Daha sonra geri kalan numunelerin ortalaması alınarak numunelerin stabilite ve akma değerlerinin ortalamadan sapma miktarları belirlenmektedir. Eğer aynı oranda sapma (stabilite için %15, akma için %20) olan numuneler varsa numune serisi iptal edilerek yeni bir seri numune üzerinde deney tekrarlanmaktadır.

Marshall stabilitesi değerinin akma değerine bölünmesi ile Marshall oranı (MQ) belirlenmektedir. Marshall oranı, karışımın sertliğinin ve asfalt betonunun deformasyona karşı direncinin bir göstergesidir [97-100].

Bitümlü sıcak karışımların nem hasarına karşı dayanımlarını belirlemek amacıyla uygulanan deney yöntemlerinden biri de Kalıcı Marshall Stabilitesi yöntemidir. Kalıcı

Marshall Stabilitesi yönteminde numuneler  $60 \pm 1^{\circ}\text{C}$  sıcaklığa sahip su banyosunda 24 saat bekletildikten sonra Marshall deneyine tabi tutulmaktadır [101, 102]. 24 saat  $60^{\circ}\text{C}$  suda bekletilen numunelerin Marshall değerinin normal Marshall değerine oranlanması ile Kalıcı Marshall Stabilitesi belirlenmektedir. Kalıcı Marshall stabilitesi değerinin yüksek olması bitümlü sıcak karışımların nem hasarına karşı dayanımlarının da yüksek olacağını göstermektedir.

#### **4.2.6. Nem Hasarına Karşı Dayanım Deneyi (AASHTO T 283)**

Uzun vadede kaplamanın performansının yüksek olmasını sağlayan en önemli parametrelerden biri bitüm ile agrega arasındaki adezyondur. Bitüm ile agrega arasına giren su adezyonun azalmasına ve bunun sonucunda BSK kaplamalarda erken bozulmalara neden olmaktadır. Bitümlü sıcak karışımların nem hasarına karşı dayanımına; agrega özellikleri, bitüm özellikleri, çevresel etkenler, trafik, drenaj ve yapım aşamasında titiz davranmak gibi birçok parametre etki etmektedir.

Superpave yönteminde bitümlü sıcak karışımların nem hasarına karşı dayanımlarını belirlemek amacıyla AASHTO T 283 standardında yer alan prosedür uygulanmaktadır. Bu deney bir performans deneyi olmamakla birlikte karışımın nem hasarına karşı dayanımını belirlemede ayrıca kullanılan katkının etkisini incelemeye de kullanılmaktadır. Bu deney prosedüründe  $7 \pm 0,5$  hava boşluğuna sahip olacak şekilde en az 6 adet numune yoğurtmalı pres ile sıkıştırılmaktadır. Standart Superpave numune hazırlama yönteminden tek farkı, kısa dönem yaşlandırma sırasında numunelerin 16 saat  $60^{\circ}\text{C}$  sıcaklıkta daha sonra da 2 saat karıştırma sıcaklığına sahip etüvde bekletilmesidir. Hazırlanan numuneler eşit hava boşluğuna sahip olacak şekilde iki gruba ayrılarak birinci grupta bulunan numuneler koşullandırma işlemine tabi tutulmaktadır. Koşullandırma işlemi uygulanacak numuneler saf su içeren piknometre içerisine konularak 10-26 in.Hg. (13-67 kPa) vakum uygulanmaktadır. Vakum işlemi numunelerdeki hava boşluklarının %70-80'i su ile doluncaya kadar devam etmektedir. Yaklaşık 5 dakikalık vakum işleminden sonra boşlukların su ile dolma oranının %70'ten az olması durumunda vakum işlemine devam edilmeli, %80'den fazla olması durumunda ise tahribat alacağından bu numuneler deneylerde kullanılmamalıdır [103]. Piknometre ve vakum aleti Şekil 4.17'de görülmektedir.



**Şekil 4.17.** Piknometre ve vakum cihazı, numunelerin koşullandırma işlemi için hazırlanması

Numunelerin doygunluk derecesi aşağıdaki formüller yardımıyla belirlenmektedir (Formül 4.33 , 4.34 ,4.35).

$$J = B' - B \quad (4.33)$$

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

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

B : Vakum işleminden önce numunenin kuru ağırlığı (gr)

$$S' = J / I * 100 \quad (4.34)$$

$$I = V_a * V / 100 \quad (4.35)$$

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 (streç film) ile kaplanarak ağzı kapanabilen ve uygun hacimdeki plastik torbalara (buzdolabı poşeti gibi) konularak torbanın içine 10 ml su konularak torbanın ağzı kapatılmaktadır (Şekil 4.17). Standarda göre numunelerin öncelikle -18°C sıcaklıkta 16 saat daha sonra da 60°C suda 24 saat bekletilmesi gerekmektedir. Bu sürenin sonunda numuneler poşet ve plastik filmden çıkarılmaktadır. Hem koşullandırılmış hem de koşullandırılmamış numuneler 25°C'deki suda 2 saat bekletilmekte ve 50 ± 2 mm/dakika hızla çapsal düzlemde yükleme yapılarak kırılmaktadır (Şekil 4.18).



Şekil 4.18. Çekme dayanımı deney düzeneği

Deneyden elde edilen maksimum yük değerleri kullanılarak çekme dayanımı değerleri aşağıdaki Formül 4.36 yardımıyla belirlenmiştir. Formülde TS çekme dayanımı (kPa),  $P_{mak}$  kırılmaya neden olan maksimum yük (kN), t ortalama numune yüksekliği (m), d numune çapını (m) ifade etmektedir. Çekme dayanımı oranı (TSR) ise koşullandırılmış numunelerin çekme dayanımı değerlerinin ( $TS_{yaş}$ ) koşullandırılmamış numunelerin çekme dayanımı değerlerine ( $TS_{kuru}$ ) oranlanması ile belirlenmektedir (Formül 4.37). Superpave şartnamesine göre bu değer minimum %80 olması istenmektedir.

$$TS = \left( \frac{2P_{mak}}{\pi dt} \right) \quad (4.36)$$

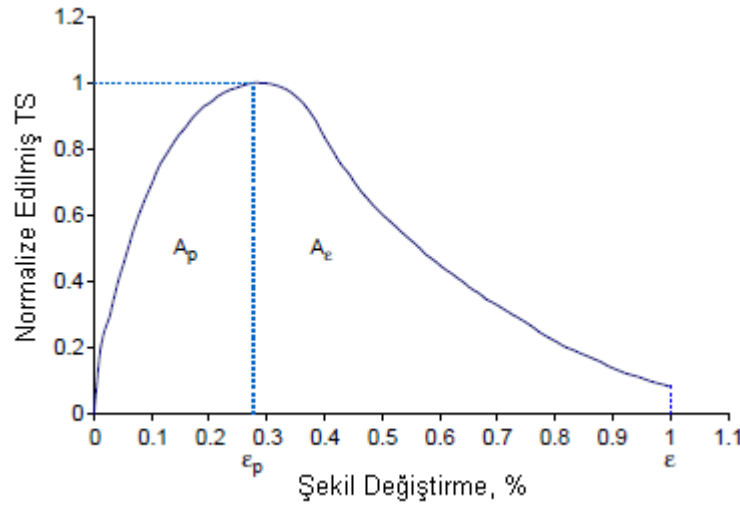
$$TSR = \left( \frac{TS_{yaş}}{TS_{kuru}} \right) * 100 \quad (4.37)$$

#### 4.2.7. Tokluk İndeksi Deneyi

Tokluk, bir malzemenin kırılmadan önce sönümlendiği enerjinin bir ölçüsüdür. Diğer bir deyişle tokluk malzemenin kırılmaya karşı direncidir (ÜN, 2010). Beton ve çelik gibi yapı malzemelerinde malzemelerin uygulanan yük karşısındaki davranışlarını karakterize etmek amacıyla tokluk sıklıkla kullanılırken bitümlü sıcak karışımlarda bu yaklaşım bugüne kadar fazla kullanılmamıştır.

Bitümlü sıcak karışımların tokluk indeksini belirlemek amacıyla hazırlanan numuneler çekme dayanımı deneyine tabi tutulmakta ve deney süresince yatay ve düşey deformasyonlar ile yük sürekli olarak bir veri toplama sistemi yardımıyla toplanmaktadır. Deney, 25°C sıcaklıkta yapılmakta olup deneyde yükleme hızı 2 inç/dakikadır (50,8 mm/dakika). Çekme dayanımı deneyinde numunenin karşılıklı iki tarafına yerleştirilen LVDT'ler ile yatay deformasyonlar ve aynı anda uygulanan yük verileri elde edilmektedir.

Yatay deformasyonlar yardımıyla yatay birim şekil değişmeler elde edilirken uygulanan yük yardımıyla Formül 4.36 kullanılarak çekme dayanımları elde edilmektedir. Maksimum indirekt çekme gerilmesi değeri 1 kabul edilip diğer oranlar belirlenerek indirekt çekme değerleri normalize edilmekte, böylelikle büyük rakamlarla uğraşılmayarak alan bulunuşunda kolaylık sağlanmaktadır. Yöntemde tokluk indeksi, alanlar arasındaki farkın gerilme farkına oranından belirlenen 0 ile 1 arasında bir değer olarak elde edildiğinden normalize edilmiş değerlerin kullanılmasının sonuca herhangi bir etkisi bulunmamaktadır. Deney sonuçlarıyla ilgili temsili bir grafik Şekil 4.19'da verilmiştir [104].



Şekil 4.19. Temsili gerilme – şekil değiştirme ilişkisi [104]

Çizilen gerilme – şekil değiştirme eğrisinin altında kalan alan tokluğu ifade ederken birimsiz olan tokluk indeksi aşağıdaki bağıntı yardımıyla belirlenmektedir.

$$TI = \frac{(A_{\varepsilon} - A_p)}{\varepsilon - \varepsilon_p} \quad (4.38)$$

Burada TI tokluk indeksi,  $A_\varepsilon$  normalize edilmiş gerilme – şekil değiştirme grafiğinde maksimum değere gelinceye kadar eğrinin altında kalan alan,  $A_p$ ,  $\varepsilon_p$  ile  $\varepsilon$  şekil değiştirme değerleri arasında eğrinin altında kalan alan,  $\varepsilon_p$  pik yük değerine ulaşıldığı andaki şekil değiştirme,  $\varepsilon$  ise seçilen birim şekil değiştirme değeridir. Tokluk indeksi değerleri ile tamamen elastik ve tamamen kırılğan malzemeler referans alınarak malzemelerin performansları değerlendirilebilmektedir. Tamamen elastik malzemelerde TI 1'e eşit olurken kırılğan malzemelerde uygulanan yük sonucunda şekil değiştirme olmadığından TI 0'a eşit olmaktadır. Bu çalışmada %3'lük birim şekil değiştirme temel alınarak hesaplama yapılmıştır. Deneyden elde edilen verilerden  $\varepsilon_p$  değerinden büyük olmak koşulu ile istenilen birim şekil değiştirme dikkate alınarak TI değerlendirilebilmektedir.

#### **4.2.8. İndirekt Çekme Rijitlik Modülü Deneyi**

BSK'ların rijitlik modülünün deneysel olarak belirlenmesinde, direkt basınç, indirekt çekme ve burulma deneyleri uygulanabilmektedir. Bütün deney metotları, viskoelastik bir malzemenin kısa süreli yüklemelerde elastik davrandığını farz etmektedir. Deney yöntemleri periyodik olarak uygulanan yükü ve bu esnada oluşan ani deformasyonları içermektedir. Rijitlik modülü, uygulanan gerilme ve geri dönen birim şekil değiştirme ile hesaplanmaktadır. Direkt basınç deneylerine göre karışımdaki bağlayıcının etkisine karşı daha hassas olan Diametral (çap doğrultusunda yük uygulanan) deneyler daha yaygın olarak kullanılmaktadır [105]. Bitümlü sıcak karışımların en önemli performans karakteristiklerinden biri de bitümlü tabakaların yük dağıtma kabiliyetinin bir ölçüsü olan rijitlik modülüdür [97]. BS DD 213 standardı ile tanımlanmış hasarsız ve deformasyon kontrollü bir deney olan indirekt çekme rijitlik modülü (ITSM) deneyi UMATTA (Universal Material Testing Apparatus) deney aleti kullanılarak yapılmaktadır (Şekil 4.20) [106].



Şekil 4.20. ITSM deney düzeneği

Deney sistemi; iklimlendirme kabini, yükleme çerçevesi, yazılım ve bilgisayardan oluşmaktadır. Standart deney sıcaklığı 20°C olmasına rağmen iklimlendirme kabini deneyin farklı sıcaklıklarda da yapılabilmesine imkan vermektedir. Deneye başlamadan önce numuneler en az 3 saat deney sıcaklığında bekletilmektedir. Numune yüksekliği, çapı, tahmini poisson oranı, hedef yatay deformasyon, yük etki süresi ve yük artış süreleri, tahmini rijitlik modülü gibi değerler önceden yazılıma girilmektedir. Daha sonra numune yükleme çerçevesine yerleştirilerek yatay deformasyonu ölçen sensörler ayarlanmaktadır. Öncelikle deneyde, numunelere ön yükleme işlemi uygulanmaktadır. 5 defa tekrarlanan ön yükleme sırasında cihaz otomatik olarak numunede yatay ekseninde hedef deformasyonu meydana getirecek yükü belirlemektedir. Sonra, numuneye ön yükleme ile belirlenen yükte uygulanan 5 darbe sonucu aşağıdaki Formül 4.39 kullanılarak ITSM değerleri belirlenmektedir.

$$S_m = \frac{F(R+0,27)}{LH} \quad (4.39)$$

Burada  $S_m$ , indirekt çekme rijitlik modülü (MPa), F maksimum dikey yük (N), H 5 yük tekrarı sonucunda oluşan ortalama yatay deformasyon (mm), L ortalama numune yüksekliği (mm), R ise poisson oranıdır (0,35).

Deney sonrasında numuneler 90° döndürülerek deney tekrarlanmaktadır. İki değer arasında %10'dan fazla sapma olması durumunda numune bir kez daha 90° döndürülerek deney tekrarlanmaktadır. Aralarında %10'dan az sapma olan iki değerın ortalaması alınarak numunenin ITSM değeri belirlenmektedir.

#### 4.2.9. İndirekt Çekme Yorulma Deneyi

Karayollarında kullanılan bitümlü malzemeler, her bir taşıt geçişinde kısa süreli bir yüke maruz kalmaktadır. Bu yükler, malzemenin rijitliğinin azalmasına neden olan mikro hasarlara yol açmaktadır ki bu mikro hasarlar da uzun dönemde yorulma çatlakları olarak adlandırılan kaplama bozulmalarına neden olmaktadır [5]. Bitümlü sıcak karışımlarda en fazla görülen ve fazla yük kaynaklı bozulma türü olan yorulma çatlakları, tekrar eden yükler sonucu çatlak oluşumunu takiben kademeli olarak artmaktadır [105]. Pratikte yorulmadan kaynaklanan bozulma belirli bir oranda kaplamanın yorulma çatlakları ile kaplanması şeklinde tanımlanmaktadır.

Bitümlü sıcak karışımların yorulma dayanımlarını tespit edebilmek amacıyla laboratuvar ortamında geliştirilmiş birçok deney bulunmaktadır. Bu deneyler, gerilme ve deformasyon kontrollü olarak yapılabilmektedir. Deney türüne göre yükleme şekli, numune geometrisi ve numunede oluşan gerilme artışı farklılık göstereceğinden yapılan bu deneylerde yorulma ömürleri de farklılık gösterebilmektedir. Yorulma ömrü üzerine yapılan çalışmalar sonucunda deformasyon kontrollü deneylerden elde edilen yorulma ömürlerinin gerilme kontrollü deneylere göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Ayrıca laboratuvar ortamında belirlenen yorulma ömrünün arazide tespit edilen yorulma ömründen çok daha kısa olduğu da tespit edilmiştir. Bu durum, yorulma ömrünün gerilme dağılımının ve kaplamanın sınır şartlarının bir fonksiyonu olduğunun kanıtıdır [107]. Buna rağmen yorulma deneyleri, farklı karışımların yorulma performanslarını karşılaştırma imkanı sağlamaktadır.

İndirekt çekme yorulma deneyi (İÇYD) ile numune kırılıncaya kadar etki eden yük tekerrür sayısı olarak tanımlanan yorulma ömrü belirlenmektedir. Her bir numune türü değişik gerilme seviyelerinde yorulma deneyine tabi tutularak farklı gerilme seviyelerindeki kırılmaya neden olan yük tekerrür sayıları bu deneyle belirlenebilmektedir ( $N_f$ ). Böylece  $N_f$  ile gerilme ( $\sigma$ ) arasındaki klasik yorulma ilişkisi logaritmik ölçekte çizilen grafikten veya aşağıdaki Wöhler formülünden yararlanılarak belirlenmektedir (Formül 4.40).

$$N_f = k_1 * \left(\frac{1}{\sigma}\right)^{k_2} \quad (4.40)$$



Burada;  $N_f$ , yorulma ömrünü ifade eden yük tekerrür sayısını,  $k_1$  ve  $k_2$  malzeme karakteristiklerini,  $\sigma$  uygulanan gerilmeyi (kPa) ifade etmektedir [108]. Yorulma denklemlerinden elde edilen  $k_1$  ve  $k_2$  katsayıları, karışımların yorulma karakteristikleri üzerinde katkı maddelerinin etkilerinin belirlenmesinde kullanılabilir. Üssel katsayı olan  $k_2$ 'nin büyük olması yorulma çizgisi eğiminin daha yatık olduğunu göstermektedir. Karşılaştırılan iki karışımın  $k_1$  değerlerinin aynı olması durumunda  $k_2$  katsayısı yüksek olan karışımın yorulma ömrü daha uzun olmaktadır. Diğer taraftan  $k_2$  değerlerinin eşit olması, karışımların yorulma ömrü eğrilerinin birbirine paralel olduğunu göstermektedir ki buda daha düşük  $k_1$  değerine sahip karışımın yorulma ömrünün daha düşük olduğunu göstermektedir [109].

Asfalt karışımlarda diğer birçok malzemede olduğu gibi gerilme veya birim deformasyon azaldıkça yorulma ömrü düzenli olarak artmaktadır. Çekme deformasyonlarının azalması malzemenin tamamen elastik davranış göstermesine (çok düşük sıcaklıklarda veya çok hızlı yüklemelerde) dolayısıyla yorulma çatlaklarının oluşmamasına sebep olmaktadır. Genellikle yorulma limitinin altındaki gerilmeler sadece elastik deformasyonlara neden olurken indirekt çekme yorulma deneyinde, plastik şekil değiştirmeler yorulma deformasyonuna ve buna bağlı olarak da yorulma çatlaklarına neden olmaktadır.

Bitümlü sıcak karışımların yorulma dayanımını belirlemek amacıyla yapılan deneyler eğilme deneyleri, direkt veya indirekt çekme deneyleri şeklinde uygulanabilmektedir. Bu deneylerde değişik geometrilere sahip numunelere sinüsoidal ve haversine gibi farklı kontrollü yükleme çeşitleri uygulanabilmektedir. TS EN 12697-24 standardında yer alan ve numune geometrisi, yükleme şekli ve test aparatına göre değişen yorulma deneyleri; trapez geometrili numuneler üzerinde uygulanan iki nokta eğilme deneyi, prizmatik numuneler üzerinde uygulanan iki nokta eğilme deneyi, prizmatik numuneler üzerinde uygulanan üç nokta eğilme deneyi, prizmatik numuneler üzerinde uygulanan dört nokta eğilme deneyi ve silindirik numuneler üzerinde uygulanan indirekt çekme deneyidir [110]. Deneyler deformasyon kontrollü olarak uygulanabildiği gibi yük kontrollü olarak da yapılabilir. Yük ve deformasyon kontrollü yorulma deneyleri arasındaki farklar Tablo 4.9. 'da verilmiştir [5].

**Tablo 4.9.** Yük ve deformasyon kontrollü yorulma deneylerinin karşılaştırılması [5]

|  | Yük kontrollü deney      | Deformasyon kontrollü deney               |
|--|--------------------------|---|
| Deney süresince değişme                      | Deplasmanın artması      | Yükün azalması                            |
| Genel kırılma kriteri                        | Numunenin kırılması      | Başlangıç rijitliğinin yarısının azalması |
| Sonuçlarının dağılımı                        | Düşük                    | Yüksek                                    |
| Sıcaklığın artması ( $> 0^{\circ}\text{C}$ ) | Yorulma ömrünün azalması | Yorulma ömrünün artması                   |
| Rijitlik modülünün artması                   | Yorulma ömrünün artması  | Yorulma ömrünün azalması                  |
| Bekleme süresinin (resting time) etkisi      | Fazla                    | Az  |
| Çatlak gelişiminin süresi                    | Kısa                     | Uzun                                      |
| Deney frekansının artması                    | Artma                    | Azalma                                    |
| Hasarın gelişimi                             | Hızlı                    | Orta                                      |

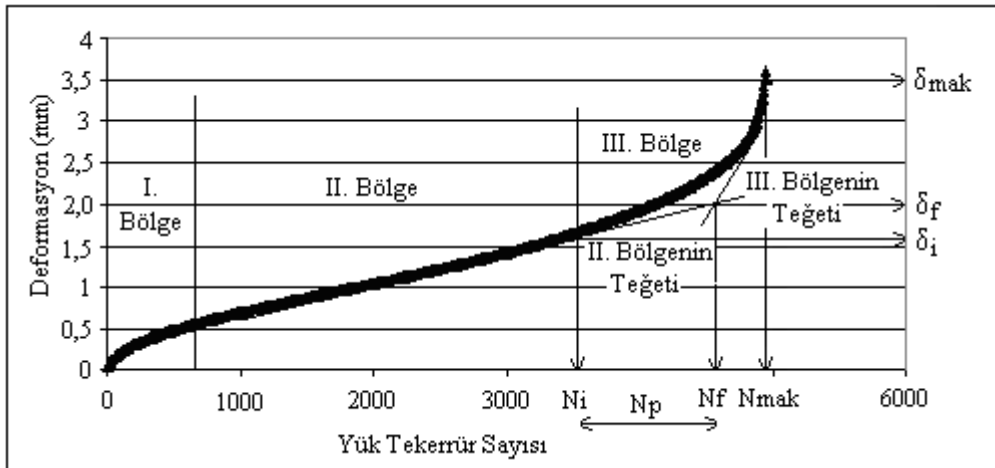
İndirekt çekme yorulma deneyinin basit olması ayrıca geometrisi nedeniyle numunelerin laboratuvar ortamı ya da araziden rahatlıkla temin edilebilmesi bu deney yöntemini en fazla tercih edilen deneylerden biri haline getirmiştir. İndirekt çekme yorulma deneyi, gerilme veya deformasyon kontrollü olarak tekrarlı yükleme altında bitümlü karışımların yorulma dayanımını karakterize etmek amacıyla kullanılmaktadır. Silindir şeklindeki deney numunelerine düşey çapsal düzlemde haversine biçiminde tekrarlı basınç yükleri uygulanmaktadır. Bu yükleme, uygulanan yük doğrultusuna dik, yatay çapsal doğrultuda nispeten üniform çekme gerilmeleri oluşturmaktadır. Oluşan çekme gerilmeleri, düşey doğrultuda numunenin orta kısmında yarıma oluşmasına neden olmaktadır.

UMATTA deney aleti kullanılarak yapılan gerilme kontrollü indirekt çekme yorulma deney (İÇYD) düzeneği Şekil 4.21’de görülmektedir. Bu deneyin sistemi de ITSM deneyinde olduğu gibi; iklimlendirme kabini, yükleme çerçevesi, yazılım ve bilgisayardan oluşmaktadır. Standart deney sıcaklığı  $25^{\circ}\text{C}$  olmasına rağmen iklimlendirme kabini sayesinde deney farklı sıcaklıklarda da yapılabilmektedir. Deney öncesinde numuneler, en az 3 saat deney sıcaklığında bekletilmektedir. Numune yüksekliği, çapı, uygulanacak gerilme yük periyodu ve yük artış süreleri gibi değerler önceden yazılıma girilmektedir. Numune, yükleme çerçevesine yerleştirilmekte, düşey deformasyonu okuyacak doğrusal değişken türevsel dönüştürücüler (LVDT) ayarlanarak deneye başlanmaktadır. Numuneler tam olarak kırılıncaya kadar deney devam etmektedir.



Şekil 4.21. Yorulma deney düzeneği

Gerilme kontrollü olarak yapılan yorulma deneyi sonucunda Şekil 4.22'de temsili olarak görüldüğü gibi yük tekerrür sayısı-deformasyon miktarı grafiği çizilebilmektedir. Yorulma ömrü, bazı araştırmacılar tarafından deformasyon - yük tekerrür sayısı grafiğinde eğimin önemli oranda değiştiği nokta veya II. kısım ve III. kısımlara çizilen teğetlerin kesim noktası olarak tanımlanmaktadır [111, 112].



Şekil 4.22. Temsili deformasyon - yük tekerrür sayısı ilişkisi

I. bölgede numunedeki boşluklardan dolayı önce aşırı deformasyon değişimi oluşmakta daha sonra aksel deformasyon oranı azalmaktadır. II. bölgede sabit oranda deformasyon söz

konusu olup yaklaşık olarak lineer değişim meydana gelmektedir. III. Bölgede ise çatlak oluşumu başlamıştır. Artık bu bölgede deformasyon değişimi artmaktadır [107]. Çatlak ilerleme oranı ( $r_p$ ), çatlak oluşuktan itibaren yorulma ömrünün sonuna kadar her 1 mm deformasyon oluşabilmesi için gerekli yük tekrar sayısını ifade etmektedir. Çatlak ilerleme oranı ile ilgili Formül 4.41 aşağıda verilmiştir [111].

$$r_p = \frac{N_p}{\delta_f - \delta_i} \quad (4.41)$$

Burada;

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

$N_p$  : Çatlak ilerlemesi için gerekli yük tekrar sayısı

$\delta_f$  : Bozulma anında toplam deformasyon ( mm )

$\delta_i$  : Çatlak başladığı andaki toplam deformasyonu ( mm ) ifade etmektedir.

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

#### **4.2.10. Kırılma Mekaniği Yaklaşımlarıyla BSK'ların Çatlak İlerleyişine Karşı**

##### **Dayanımlarının Belirlenmesi**

Bitümlü sıcak karışımlarda oluşan bozulmalar; şekil değiştirme, kırılma (çatlama) ve ayrışma olarak üç ana grupta toplanabilmektedir [113]. Bitümlü sıcak karışımlarda oluşan çatlaklar ise trafik etkisine bağlı olan ve olmayan çatlaklar olarak iki şekilde incelenmektedir. Çatlak oluşumunu üstyapı tabakalarının kalınlığı ve bitümlü sıcak karışımların malzeme özellikleri gibi birçok faktör etkilemektedir [114, 115]. Trafik etkisine bağlı çatlamlar ya ağır dingil yüklerinin tek veya birkaç kez geçmesi sonucunda ya da taşıtların tekrarlı olarak kaplamanın üzerinden geçmeleri sonucunda oluşmaktadır. Taşıtların çok sayıda geçmesi sonucu oluşan çatlaklara da yorulma çatlakları denilmektedir. Birinci durumda çatlak, ağır dingil yükünün oluşturduğu gerilmenin asfalt betonunun eğilme-çekme direncini aşmasından kaynaklanmaktadır. Yorulmada ise dingil yüklerinin tekrarlı geçişi sonrasında oluşan kalıcı deformasyonların birikimiyle yorulma çatlakları oluşmaktadır [113]. Çatlamlar, trafik

yüklerine bağı olmadan çevre etkisi, sıcaklık ve nem etkisiyle de oluşabilmektedir. Bitümlü sıcak karışımlarda oluşan çatlamlar;

- Timsah sırtı çatlaklar (yorulma çatlakları)
- Büzülme çatlakları
- Kenar çatlakları
- Derz çatlakları
- Enine çatlaklar
- Yansıma çatlakları
- Öteleme çatlakları şeklinde sınıflandırılmaktadır [25, 54].

Son zamanlarda yapılan pek çok çalışmada; karayollarında oluşan çatlaklar nedeniyle kırılma mekaniği prensiplerinin bitümlü sıcak karışımlara uygulanması araştırılmıştır. Malzemelerin gerilme altında birden fazla parçaya ayrılması kırılma olarak tarif edilmektedir. Malzemeden malzemeye göre değişen kırılma türü genellikle tatbik edilen gerilmeye, sıcaklığa ve deformasyon hızına bağlıdır. Kırılma başlıca iki safhadan oluşur, birinci safha “çatlak teşekkülü”, ikinci safha ise “çatlağın ilerlemesi” dir [116]. Makroskobik açıdan kırılma tipleri gevrek, sünek ve sürüntü kırılmasıdır. Hiçbir plastik deformasyon meydana gelmeden oluşan kırılma gevrek kırılmalardır. Sünek kırılmada da kırılmadan önce önemli oranda plastik deformasyon meydana geldikten sonra malzeme kırılmaktadır. Sürüntü kırılmasında ise yüksek sıcaklıklarda sabit gerilme veya sabit yük altında malzemelerin sürünme deformasyonu sonucunda kırılma oluşmaktadır. Makroskopik açıdan bakıldığında, sürünme kırılması malzemede plastik deformasyon sonucunda oluştuğundan bir nevi sünek kırılmadır. Mikroskopik açıdan ise; sürünme kırılması, sünek kırılmadan farklı olduğu tespit edilmiştir [116]. Taneleri kesip kesmemeye göre ise intergranüler (taneler arası) kırılma ve transgranüler (taneleri keserek) kırılma olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır.

Kırılma mekaniği ise malzemede var olan çentik, çatlak ve boşluk gibi gerilme yığılmasını arttıran kusurları ve bunlara bağı olarak meydana gelen hasarları inceleyen bir bilim dalıdır [117]. Kırılma mekaniğinin temelleri, 1920’li yıllarda malzemelerde oluşan çatlakların ilerleyişini açıklamak amacıyla Griffith tarafından atılmıştır. Enerji dengesine dayalı olarak kırılma malzemeler için kırılma mekaniği Griffith tarafından formüle edilmiştir. Griffith, potansiyel enerjinin cismin yüzey enerjisinden büyük olması durumunda çatlak boyutunun artacağını belirtmiştir. Griffith’in teorisi cam gibi tam gevrek malzemelerde çatlağın yayılması için gerekli gerilmeyi belirlemesine rağmen çatlağın yayılmadan önce veya sonrası için herhangi bir bilgi vermemektedir. 1957 yılına gelindiğinde Irwin kırılma mekaniğinde

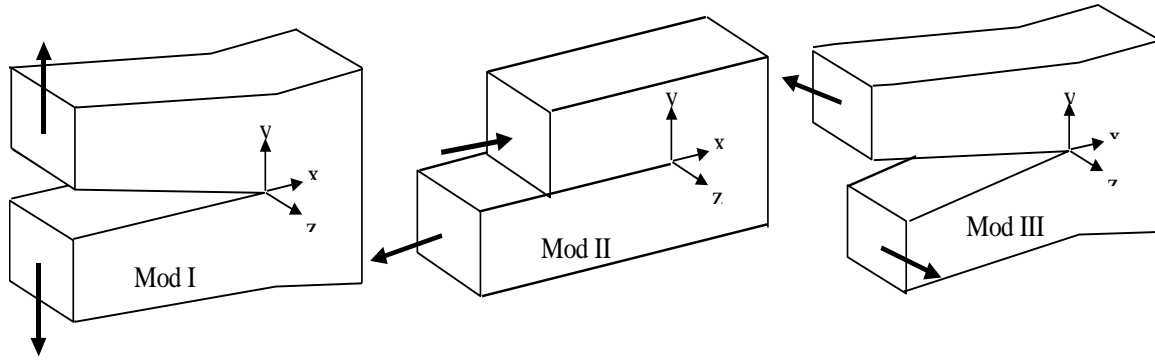
Yeni bir dönem başlatmıştır. Irwin, teoriyi plastik şekil değiştirme gösteren malzemeleri de içine alacak şekilde geliştirerek sırasıyla çekme, kesme ve burulma durumlarına karşılık gelen üç yükleme durumu Mod I, Mod II ve Mod III olarak genel kırılma modlarını (Şekil 4.23) ve K adı verilen gerilme şiddet çarpanını ortaya koymuştur (Formül 4.42 , 4.43 , 4.44), (İnce, 1998).

$$K_I = \sigma\sqrt{\pi a} \quad (4.42)$$

$$K_{II} = \tau\sqrt{\pi a} \quad (4.43)$$

$$K_{III} = \tau\sqrt{\pi a} \quad (4.44)$$

Denklemlerde  $\sigma$ , malzemeye uygulanan çekme gerilmesini,  $\tau$ , kesme gerilmesini ve  $a$  yarı çatlak uzunluğunu ifade etmektedir.



Şekil 4.23. Kırılma modları

Gerilme şiddet çarpanı (K), geometriye ve yükleme durumuna bağlı bir sabittir. Yani herhangi bir malzeme aynı geometriye ve yükleme durumuna maruz kalırsa bu değer sabit olacaktır. Dolayısıyla gerilme şiddet çarpanı bir malzeme sabiti değildir. K, belirli bir kritik değer olan  $K_c$  değerine ulaştığında kırılma tokluğu veya kritik gerilme şiddet çarpanı adını almakta ve bu değer her malzeme için farklı bir değer olmaktadır.

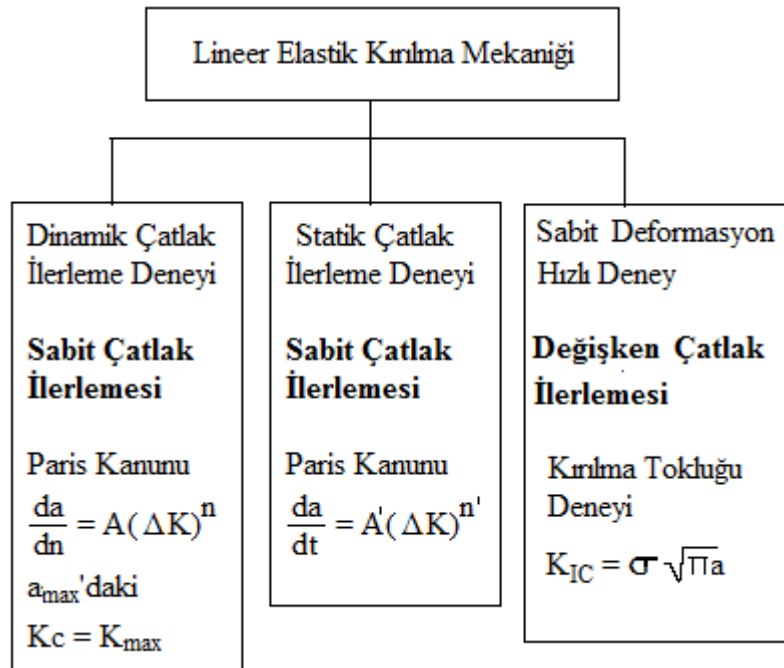
Şekil 4.23'te görülen Mod I kırılma, çatlak düzlemi boyunca uygulanan yükler sonucu oluşmaktadır. Bitümlü sıcak karışımlarda trafik yükleri ve termal gerilmeler sonucunda bu tür kırılmalar meydana gelmektedir. Mod II kırılma aynı zamanda düşey yönde kesmeye dayanım modu olarak isimlendirilmekte olup gerilmenin kayma bileşeni, çatlakla x eksenine doğrultusunda etki etmektedir. Bitümlü sıcak karışımlarda trafik yükleri bu tip kırılmalara neden olabilmektedir. Mod III kırılmada burulma etkisi söz konusu olup gerilmenin kayma

bileşeni, çatlağa z eksenine doğrultusunda, çatlağın dip kenarına paralel olarak etkimektedir. Bu tip kırılma bitümlü sıcak karışımlarda ihmal edilebilmektedir [118]. Mod I durumu için kritik gerilme şiddet çarpanı aşağıdaki Formül 4.45 ile belirlenebilmektedir.

$$K_{IC} = \sigma_N \sqrt{\pi a} f\left(\frac{a}{w}\right) \quad (4.45)$$

Burada  $K_{IC}$ , kritik gerilme şiddet çarpanını  $\sigma$ , malzemeye uygulanan çekme gerilmesini  $a$ , yarı çatlak uzunluğunu ve  $f\left(\frac{a}{w}\right)$  numune boyutları ile ilgili geometrik faktörü ifade etmektedir.

Lineer elastik kırılma mekaniğinin temelini Irwin'in ortaya koyduğu bu çalışmalar oluşturmuştur. Bitümlü sıcak karışımlarda lineer elastik kırılma mekaniği çeşitli deney yöntemleriyle uygulanabilmektedir. Dinamik çatlak ilerleme deneyi, statik çatlak ilerleme deneyi ve sabit deformasyon hızlı deney ile bitümlü sıcak karışımlarda lineer elastik kırılma mekaniği uygulanabilmektedir (Şekil 4.24), [119].



Şekil 4.24. BSK'lara uygulanan lineer elastik kırılma mekaniği deneyleri [119]

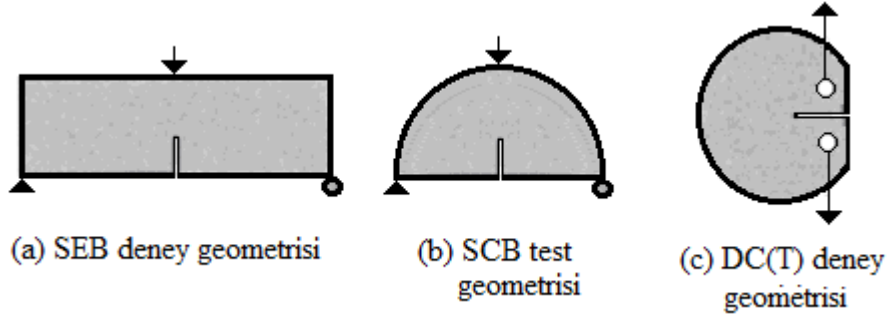
Dinamik çatlak ilerlemesi deneyinde önceden çentik açılmış numuneye periyodik olarak yük uygulanmaktadır. Sabit deformasyon hızlı deneyde adından da anlaşılacağı gibi sabit

deformasyon hızında numuneye yük etki ettirilmektedir. Kırılma tokluğu deneyi ve çekme dayanımı deneyleri olmak üzere iki farklı sabit deformasyon hızlı deney bulunmaktadır. Kırılma tokluğunu belirlemek için uygulanan deneylerde numunelere çentik açılırken çekme deneylerinde numuneler çentik açılmadan doğrudan deneye tabi tutulmaktadır. Özel bir deney olan statik çatlak ilerleme deneyinde önceden oluşturulmuş çatlağa sahip olan numuneye sabit çatlak ilerlemesi sağlayacak şekilde yük uygulanmaktadır. Şekil 4.24’de görüldüğü üzere dinamik çatlak ilerleme deneyinde çatlak ilerlemesi karakterize edilirken sabit deformasyon hızlı deney ile kırılmaya karşı dayanım belirlenebilmektedir. Çatlak ilerlemesi deneyinde çatlaktaki ilerleme sabitken kırılma tokluğu deneyinde çatlaktaki açılma düzenli değildir. Dinamik çatlak ilerleme davranışı, Paris kanunu ile karakterize edilebilmektedir. Dinamik çatlak ilerleme deneyinde A ve n sabitler olup kritik gerilme şiddet çarpanı deney sırasındaki gerilme ve çatlak ilerleyişinden elde edilmektedir. Çatlak ilerleme deneyleri zor ve pahalı ekipmanlar gerektirdiğinden asfalt karışım dizaynı gibi rutin uygulamalar için tavsiye edilmemektedir. Paris kanununa uygun çatlak ilerleme deneyleri yerine kırılma tokluğu yönteminin kullanılması daha kolay ve etkili bir yöntemdir.

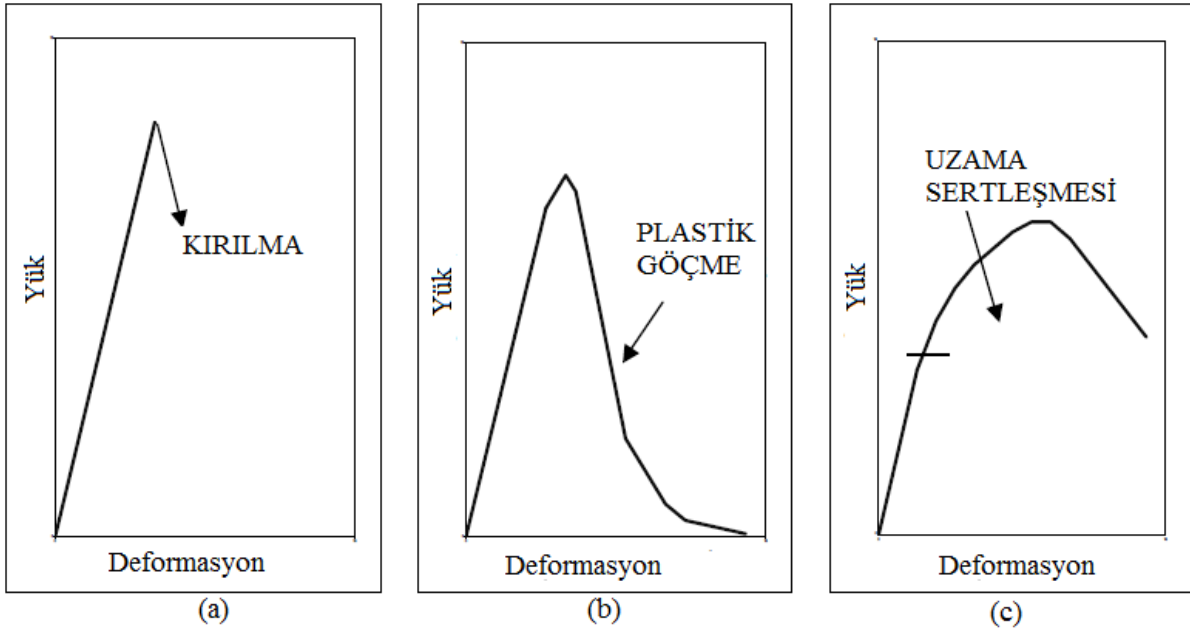
Sabit deformasyon hızlı deneyde farklı numune geometrileri kullanılabilir. Şekil 4.25’de en sık kullanılan numune geometrileri gösterilmiştir. Kiriş numunelerin hazırlanma zorluğu ve kiriş boyutları için herhangi bir standart bulunmaması gibi dezavantajları vardır [120]. Disk şeklindeki çekme deneyinde de numunenin kesilmesinde ve delik açılmasında zorluklarla karşılaşılabilir. Yarım daire eğilme deney numunelerinin hem arazide hem de laboratuarda kolayca elde edilebilmesinin yanında hazırlanma sırasında numunede meydana gelen homojenliğin azalması ihtimali de numunenin ortadan ikiye bölünmesi ile azalmaktadır [121]. Numunedeki çentiğin açısına bağlı olarak Mod I ve Mod I ile Mod II türü kırılmanın birlikte olduğu durumlar için kritik gerilme şiddet çarpanı değerleri belirlenebilmektedir [122].

Bitümlü sıcak karışımlar sıcaklık ve yükleme hızına bağlı olarak elastik ve viskoz davranış gösterebilmektedirler. Normal şartlarda ise bitüm viskoelastik davranış göstermektedir. Yarım daire numunelerde sıcaklıkla yük-deformasyon eğrisinin değişimi Şekil 4.26’da verilmiştir. Yapılan çalışmalar sonucu başlıca üç yük-deformasyon diyagram şekli olduğu tespit edilmiştir. Düşük sıcaklıklarda (1°C veya daha düşük) asfalt karışımlar tamamen elastığe yakın davranış sergilediğinden uygun yükleme hızlarında 1°C veya daha düşük sıcaklıklarda lineer elastik kırılma mekaniği bitümlü sıcak karışımlara uygulanabilmektedir.





**Şekil 4.25.** Kırılma deneylerinde en çok kullanılan deney geometrileri (a) tek çentikli kiriş eğilme deneyi (b) yarım daire eğilme deneyi (c) disk şeklinde numune çekme deneyi [120]



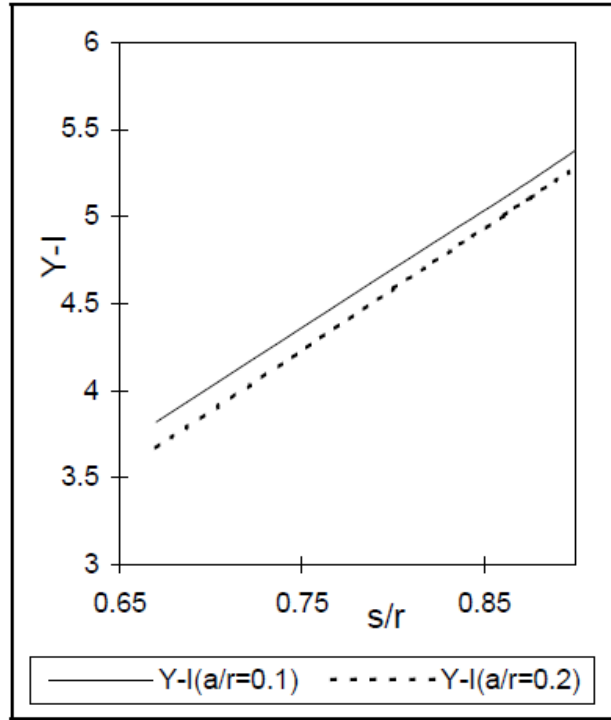
**Şekil 4.26.** SCB deneyinde asfalt karışımların elde edilen başlıca yük-deformasyon diyagram türleri. (a)  $-10^{\circ}\text{C}$  veya  $1^{\circ}\text{C}$  sıcaklıktaki elastik kırılma (b)  $15^{\circ}\text{C}$  sıcaklıktaki plastik göçme (uzama sertleşmesi yok) (c)  $25^{\circ}\text{C}$  veya daha yüksek sıcaklıkta oluşan uzama sertleşmesi [119]

Lim ve diğ. tarafından yarım daire numune şekline sahip bitümlü sıcak karışımlar üzerinde lineer elastik kırılma mekaniği (LEKM) uygulanmıştır [123]. Yapılan çalışma sonucunda Mod I kırılma için kritik gerilme şiddet çarpanının ( $\text{N}/\text{mm}^{3/2}$ ) aşağıdaki Formüller 4.46 ve 4.47 yardımıyla belirlenebileceğini belirtmişlerdir.

$$K_{IC} = \sigma_0 \sqrt{\pi a} Y_I \quad (4.46)$$

$$\sigma_0 = \frac{P_0}{BD} \quad (4.47)$$

Burada  $P_0$ , uygulanan maksimum yükü (N) B, numune yüksekliğini (mm) D, numune çapını (mm) ifade etmektedir.  $Y_I$  değeri Lim ve diğ. tarafından belirlenerek grafik halinde verilmiştir (Şekil 4.27). Şekilde 2S mesnetler arası yatay açıklığı,  $2r$  numune çapını (mm), a çentik boyunu (mm) ifade etmektedir.



Şekil 4.27.  $Y_I$  değerinin belirlenmesi [123]

#### 4.2.10.1. Yarım Daire Eğilme Deneyi (EN 12697-44)

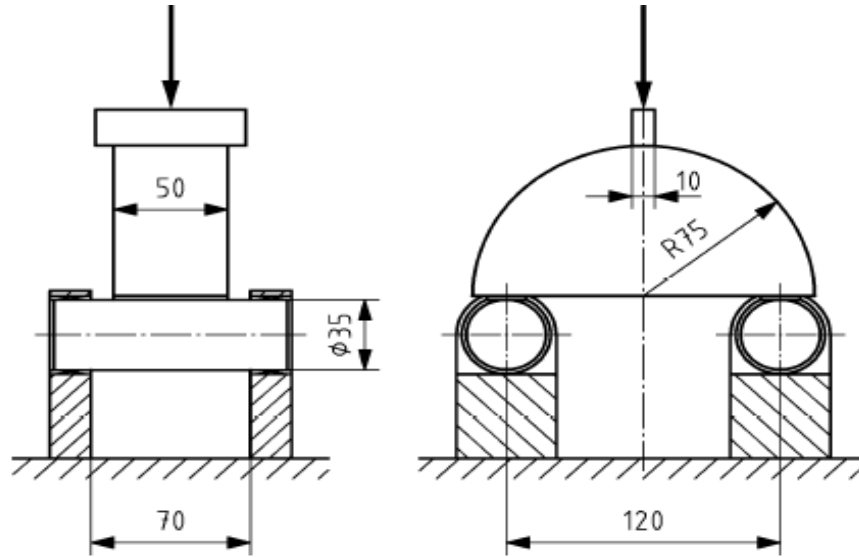
Hoffman ve ekibi tarafından yapılan çalışmada deney sıcaklığı olarak  $0 \pm 1^\circ\text{C}$ 'yi ve 5,1 mm/dak yükleme hızını kullanarak bitümlü sıcak karışımlar üzerinde yarım daire eğilme deneyi uygulanmıştır [124]. Aşağıdaki Formül 4.48 , 4.49 ve 4.50 yardımıyla kritik gerilme şiddet çarpanı ( $K_{IC}$ ) değerlerini belirlemişlerdir.

$$\sigma_{mak} = \frac{4,263 * F_{mak}}{D * t} \quad (4.48)$$

$$K_{IC} = \sigma_N \sqrt{\pi a} f\left(\frac{a}{w}\right) \quad (4.49)$$

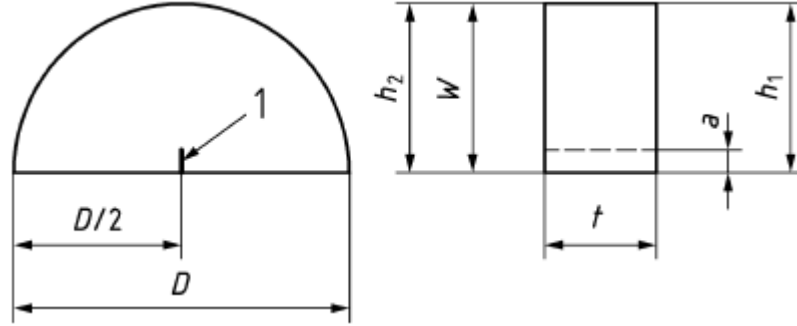
$$f\left(\frac{a}{w}\right) = -0,623 + 29,29 * \left(\frac{a}{w}\right) - 171,2 * \left(\frac{a}{w}\right)^2 + 457,1 * \left(\frac{a}{w}\right)^3 - 561,2 * \left(\frac{a}{w}\right)^4 + 265,54 * \left(\frac{a}{w}\right)^5 \quad (4.50)$$

Bitümlü sıcak karışımların Lineer Elastik Kırılma Mekaniği'ne göre değerlendirilmesiyle ilgili Bakker tarafından Hollanda'da yapılan çalışmalarda farklı bitümler içeren araziden alınan ve laboratuarda hazırlanan numuneler üzerinde yarım daire eğilme deneyleri uygulanmış ve bu deneyler sonucunda elde edilen veriler kullanılarak EN 12697-44 standardı hazırlanmıştır [125]. Ağustos 2010'da standartlaşan deneyde yarım silindir şeklindeki deney numunesinin alt yüzeyinin ortasına çentik açılmakta ve bu numune üç noktalı eğilme deneyine tabi tutulmaktadır. Deney süresince deformasyon 5 mm/dak sabit hızla artmaktadır. Standarda göre maksimum yük, malzemenin çatlak ilerleyişine karşı dayanımıyla doğrudan alakalıdır. Deney aparatları ve numune şekli ile ilgili örnek bir resim aşağıda verilmiştir (Şekil 4.28) [126].



Şekil 4.28. Yarım daire eğilme deney düzeneği

Deney hem araziden alınan hem de laboratuvarında hazırlanan numuneler üzerinde uygulanabilmektedir. Numuneler  $150 \pm 1$  mm çapında ve  $50 \pm 3$  mm kalınlığında kesilmektedir. Kesme işlemi sırasında yüzeylerin düzgün ve birbirine paralel olmasına dikkat edilmelidir. Sonra numuneler ortadan ikiye bölünerek yarım daire şeklinde iki numune elde edilmektedir. Yarım daire numunelerin düz kısmının ortasına genellikle  $0,35 \pm 0,1$  mm genişliğinde ve  $10 \pm 1$  mm yüksekliğinde çentik açılmaktadır (Şekil 4.29).



Şekil 4.29. Numuneye çentik açılması

Deney sırasında kuru olan numune, kesme işlemi su ile yapıldığı için kesme işleminden hemen sonra kullanılmamalı  $15^{\circ}\text{C}$ 'den daha düşük bir sıcaklıkta düz bir yüzeyde bekletilmelidir. Numuneler havada kurutulmalı, 30 dakika içinde ağırlık değişimi 0,1 gr'dan az olduğunda numuneler deney işlemlerine tabi tutulmalıdır. Şekil 4.29'da görülen  $h_1$  ve  $h_2$  numune yükseklikleri arasındaki fark 0,5 mm'den az olmalı, fazla olan numuneler kullanılmamalıdır. Aynı şekilde düzgün yüzeyin iki uç noktasından ölçülen taban kalınlıkları arasındaki fark 0,5 mm'den fazla ise numune kullanılmamalıdır.

Numune, genellikle kullanılan deney sıcaklığı olan  $0 \pm 1^{\circ}\text{C}$  sıcaklıkta en az 4 saat bekletilmelidir. Sürenin sonunda numune iklimlendirme kabininden çıkarılarak deney düzeneğine yerleştirilmeli, kısa bir süre içinde numunenin mesnetler üzerinde ortalanması sağlanmalıdır.  $5 \pm 0,2$  mm/dak hızla yükleme yapılarak düşey deformasyonun 0,01 mm hassasiyetle yükün ise 1 N hassasiyetle kayıt altına alınması sağlanmalıdır. Numunenin iklimlendirme kabininden çıkarılışı ile numunenin kırılması 60 saniye içerisinde tamamlanmalıdır. Çatlak ilerleyişi numunenin merkezinden  $\pm 15$  mm den fazla sapsa numune geçersiz sayılmalıdır.

Deney sonucunda maksimum yük ( $F_{\text{mak}}$ ) ve maksimum düşey deformasyon ( $\Delta W$ ) değerleri elde edilmektedir. Maksimum yük anındaki şekil değiştirme aşağıdaki Formül 4.51 yardımıyla belirlenmektedir.

$$\varepsilon_{mak} = \frac{\Delta W}{W} * 100 \quad (4.51)$$

Burada W, numunenin yüksekliğini (mm)  $\Delta W$ , maksimum yük sırasındaki deformasyonu (mm)  $\varepsilon_{mak}$ , maksimum birim şekil değiştirmeyi (%) ifade etmektedir. Kırılmaya neden olan maksimum gerilme ( $\sigma_{mak}$ ) aşağıdaki Formül 4.52 ile belirlenmektedir.

$$\sigma_{mak} = \frac{4,263 * F_{mak}}{D * t} \quad (4.52)$$

Burada D, numunenin çapını (mm), t, numunenin kalınlığını (mm),  $F_{mak}$ , maksimum yükü (N),  $\sigma_{mak}$ , maksimum gerilmeyi ( $N/mm^2$ ) ifade etmektedir. Kırılma tokluğu ( $K_{IC}$ ) ise aşağıdaki Formül 4.53 yardımıyla belirlenmektedir.

$$K_{IC} = \sigma_{mak} * f\left(\frac{a}{W}\right) \quad (4.53)$$

Burada W, numune yüksekliğini (mm) a, çentik yüksekliğini (mm)  $\sigma_{mak}$ , maksimum gerilmeyi ( $N/mm^2$ ),  $K_{IC}$  kırılma tokluğunu ( $N/mm^{3/2}$ ),  $f\left(\frac{a}{W}\right)$ , numunenin geometrik faktörünü ifade etmektedir. Geometrik faktör birimsiz olup virgülden sonra üç hane olacak şekilde yuvarlanmaktadır. Çatlak yüksekliği  $9 \text{ mm} < a < 11 \text{ mm}$  ve numune yüksekliği  $70 \text{ mm} < W < 75 \text{ mm}$  ise  $f\left(\frac{a}{W}\right) = 5,956$  olarak alınmaktadır. Eğer deneyde daha farklı çentik yükseklikleri kullanılmışsa veya numune yüksekliği farklı ise geometrik faktör aşağıdaki Formül 4.54 yardımıyla belirlenmektedir.

$$f\left(\frac{a}{W}\right) = -4,9965 + 155,58 * \left(\frac{a}{W}\right) - 799,94 * \left(\frac{a}{W}\right)^2 + 2141,9 * \left(\frac{a}{W}\right)^3 - 2709,1 * \left(\frac{a}{W}\right)^4 + 1398,6 * \left(\frac{a}{W}\right)^5 \quad (4.54)$$

Çentiksiz numunelerde çekme dayanımı Formül 4.52'den elde edilen maksimum gerilmeye eşit olmaktadır.

#### 4.2.10.2. Üç Nokta Eğilme Kırılma Deneyi

Üç nokta eğilme deneyi (SE(B)) geometrisi; bitümlü sıcak karışımların kırılmaya karşı dayanımının belirlenmesinde en sık kullanılan deney yöntemidir [120, 127]. Diğer deney geometrilerine göre üç nokta eğilme geometrisi basit yükleme konfigürasyonu, Mod 1 kırılmada stabil çatlak ilerleyişinin gözlenmesi gibi avantajlara sahiptir [120]. Bu deney geometrisi kırılma deneylerinde sıkça kullanılmasına rağmen dikdörtgenler prizması şeklindeki numuneler için herhangi bir standart deney yöntemi bulunmamaktadır. Bu çalışmada Kim ve Hüssein tarafından kullanılan boyutlar numune boyutu olarak seçilmiştir [128]. Bu amaçla, 30,5\*30,5\*5,0 cm boyutlarındaki slab numuneler %4 hava boşluğuna sahip olacak şekilde merdaneli sıkıştırıcı ile sıkıştırılmıştır. Çalışmada kullanılan merdaneli sıkıştırıcı Şekil 4.30'da görülmektedir.



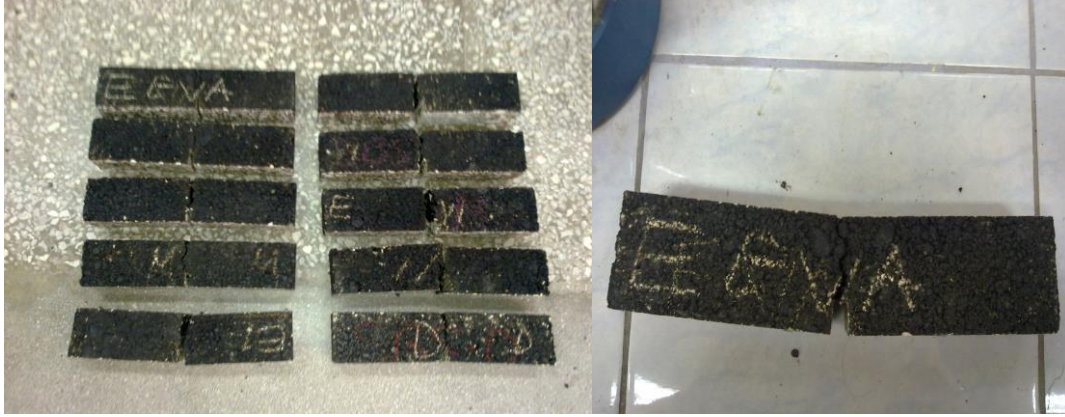
Şekil 4.30. Merdaneli sıkıştırıcı

Numuneler için gerekli BSK miktarı aşağıda verilen denklem kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$M = 10^{-6} * L * l * e * \rho_m * ((100 - v) / 100) \quad (4.55)$$

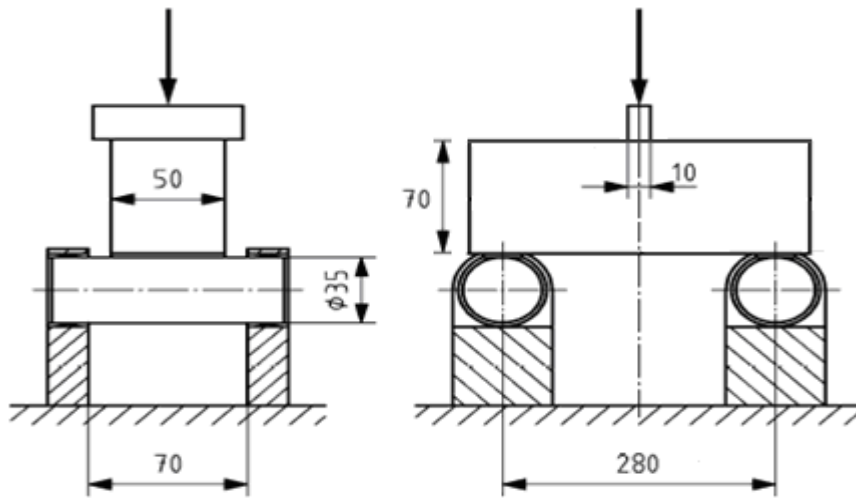
Formüldeki;  $M$ , numune ağırlığı (kg),  $L$ , en düşük kalıp uzunluğu(mm),  $l$ , en düşük kalıp kalınlığı(mm),  $e$ , numunenin son yüksekliği (mm),  $\rho_m$ , bitüm karışımının maksimum yoğunluğu ( $\text{kg/m}^3$ ),  $v$ , numunenin hava boşluklarını ifade etmektedir.

Numune tamamen soğuduktan sonra testere yardımıyla deney geometrisine (70 mm yükseklik, 50 mm genişlik ve 300 mm uzunluk) uygun olacak şekilde kesilmiştir. Kesilen numuneler Şekil 4.31’de görülmektedir.



Şekil 4.31. Üç nokta eğilme deney numune örnekleri

Başlangıçta numunede açılan çentik bütün numunelerde, çatlakın tüm yüksekliğe oranı ( $a_0/W$ ) 0,3 olacak biçimde 21 mm derinliğinde ( $a_0$ ) açılmıştır. Çatlak, numunenin alt yüzeyinin orta noktasına açılmıştır. Numuneler özel üç nokta eğilme deney konfigürasyonunda 3,24 mm/dak yükleme hızında kırılmışlardır. Yükleme mesnet açıklığı/numune yüksekliği 4 olacak şekilde ayarlanmıştır. Yükleme konfigürasyonu Şekil 4.32’de görülmektedir.



Şekil 4.32. Üç nokta eğilme deney düzeneği

Deformasyon ve yük değerlerinden faydalanılarak öncelikle efektif çatlak modeli (ECM) kullanılarak bitümlü sıcak karışımların Young modülleri ( $E$ ) belirlenmiştir [129];

$$E = \frac{P_i}{4B\delta_i} \left( \frac{S}{W} \right)^3 \left[ 1 + \frac{5wS}{8P_i} + \left( \frac{W}{S} \right)^2 \left[ 2.70 + 1.35 \frac{wS}{P_i} \right] - 0.84 \left( \frac{W}{S} \right)^3 \right] + \frac{9P_i}{2B\delta_i} \left( 1 + \frac{wS}{2P_i} \right) \left( \frac{S}{W} \right)^2 F_2(\alpha_0) \quad (4.56)$$

Burada,  $P_i$ ,  $P_{max}/2$  (N),  $\delta_i$   $P_i$  (mm) değerindeki deformasyon;  $B$ ,  $W$  ve  $S$  numunenin genişliği, yüksekliği ve uzunluğu (mm);  $E$  ve  $w$  elastik (Young) modülü ve kirişin birim uzunluğunun ağırlığıdır.  $F_2(\alpha_0)$  aşağıdaki bağıntıyla belirlenebilmektedir.

$$F_2(\alpha_0) = \int_0^{\alpha_0} \beta F_1^2(\beta) d\beta_1 \quad (4.57)$$

$\alpha_0 = a_0/W$ , ve  $S/W = 4$  için

$$F_1(\beta) = \frac{1.99 - \beta(1 - \beta)(2.15 - 3.93\beta + 2.70\beta^2)}{(1 + 2\beta)(1 - \beta)^{1.5}} \quad (4.58)$$

Kirişin rijitliğindeki azalma hem sabit çatlak ilerleyişinin hem de görünür çatlakın formasyonundan kaynaklanmaktadır. Bu iki durumu ayırmak zordur. Bu yüzden kritik çentik derinliği ( $a_e$ ),  $a_e$  çentiğini içeren hayali bir kirişin değişmeyen rijitliğinin ( $E$  ile orantılı)  $a_0$  yüksekliğinde çentik içeren gerçek bir kirişin azalan rijitliğine eşit olmasıyla hesaplanabilir.

$$\delta_{max} = \frac{P_{max}}{4BE} \left( \frac{S}{W} \right)^3 \left[ 1 + \frac{5wS}{8P_{max}} + \left( \frac{W}{S} \right)^2 \left[ 2.70 + 1.35 \frac{wS}{P_{max}} \right] - 0.84 \left( \frac{W}{S} \right)^3 \right] + \frac{9P_{max}}{2BE} \left( 1 + \frac{wS}{2P_{max}} \right) \left( \frac{S}{W} \right)^2 F_2(\alpha_e) \quad (4.59)$$

Burada,

$$F_2(\alpha_e) = \int_0^{\alpha_e} \beta F_1^2(\beta) d\beta_1 \quad (4.60)$$



Burada  $\alpha_e = a_e / W$  ve  $F_1(\beta)$  Formül 4.58'de verilmiştir. Kritik gerilme şiddet çarpanı ( $K_{IC}$ ) aşağıdaki bağıntı kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$K_{IC} = \sigma_n \sqrt{a_e} F(\alpha) \quad (4.61)$$

Burada,

$$\sigma_n = \frac{3(P_{\max} + wS/2)S}{2bd^2} \quad (4.62)$$

## 5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

### 5.1. Superpave Sistemine Göre Malatya İçin Uygun Bağlayıcının Seçilmesi

Bu çalışmada; bağlayıcı seçiminde uygulama bölgesi olarak Malatya ili seçilmiştir. Coğrafi konum olarak 35°54' ile 39°03' enlemleri arasında bulunan Malatya'nın, Meteoroloji Bölge Müdürlüğü'nden temin edilen son 22 sene içerisindeki her yılın ardı ardına en yüksek 7 günlük ve en düşük bir günlük hava sıcaklığı değerleri Tablo 5.1'de verilmiştir.

**Tablo 5.1.** Malatya'nın 22 yıllık en yüksek ve en düşük hava sıcaklık değerleri

| Tarih                 | Yüksek Sıcaklık (°C) |        |        |        |        |        |        | Tarih      | Düşük Sıcaklık (°C) |
|-----------------------|----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|------------|---------------------|
|                       | 1. Gün               | 2. Gün | 3. Gün | 4. Gün | 5. Gün | 6. Gün | 7. Gün |            |                     |
| 30.07.1991-05.08.1991 | 37.7                 | 38.8   | 35.0   | 36.0   | 38.2   | 38.2   | 39.2   | 07.02.1991 | -14.7               |
| 01.09.1992-07.09.1992 | 35.4                 | 34.6   | 34.0   | 33.8   | 35.2   | 33.2   | 34.6   | 09.02.1992 | -14.4               |
| 18.07.1993-24.07.1993 | 33.2                 | 34.6   | 39.1   | 40.1   | 40.2   | 39.4   | 36.9   | 13.01.1993 | -17.0               |
| 10.07.1994-16.07.1994 | 35.0                 | 37.0   | 37.5   | 38.6   | 37.5   | 36.0   | 34.0   | 07.12.1994 | -13.2               |
| 01.08.1995-07.08.1995 | 35.8                 | 36.0   | 36.0   | 37.0   | 35.4   | 35.3   | 34.8   | 19.01.1995 | -11.0               |
| 12.07.1996-18.07.1996 | 36.7                 | 36.9   | 37.0   | 37.0   | 35.3   | 36.2   | 37.6   | 02.02.1996 | -8.4                |
| 29.07.1997-04.08.1997 | 35.0                 | 35.0   | 34.0   | 35.2   | 35.2   | 35.4   | 36.8   | 06.02.1997 | -13.7               |
| 15.07.1998-21.07.1998 | 39.2                 | 39.7   | 40.1   | 36.2   | 37.0   | 39.4   | 40.2   | 12.01.1998 | -10.0               |
| 15.08.1999-21.08.1999 | 37.2                 | 37.0   | 37.2   | 36.8   | 38.2   | 38.8   | 38.4   | 21.02.1999 | -7.0                |
| 26.07.2000-01.08.2000 | 37.5                 | 38.1   | 39.7   | 39.9   | 41.4   | 42.2   | 40.5   | 22.01.2000 | -14.6               |
| 25.07.2001-31.07.2001 | 40.4                 | 41.2   | 40.4   | 40.1   | 38.2   | 39.0   | 39.4   | 23.11.2001 | -12.0               |
| 16.07.2002-22.07.2002 | 34.0                 | 34.7   | 36.0   | 39.3   | 39.3   | 37.8   | 38.0   | 27.12.2002 | -19.0               |
| 02.08.2003-08.08.2003 | 36.8                 | 37.4   | 37.3   | 36.3   | 33.4   | 34.3   | 38.2   | 23.02.2003 | -12.4               |
| 27.07.2004-02.08.2004 | 36.0                 | 35.5   | 36.5   | 36.6   | 37.8   | 38.4   | 37.8   | 16.02.2004 | -11.4               |
| 14.08.2005-20.08.2005 | 35.4                 | 38.3   | 38.8   | 38.2   | 38.0   | 38.4   | 36.8   | 10.02.2005 | -8.2                |
| 10.08.2006-16.08.2006 | 38.0                 | 39.0   | 40.0   | 41.5   | 40.6   | 39.6   | 40.2   | 22.01.2006 | -10.6               |

**Tablo 5.1.** Malatya'nın 22 yıllık en yüksek ve en düşük hava sıcaklık değerleri (Devamı)

| Tarih                 | Yüksek Sıcaklık (°C) |        |        |        |        |        |        | Tarih      | Düşük Sıcaklık (°C) |
|-----------------------|----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|------------|---------------------|
|                       | 1. Gün               | 2. Gün | 3. Gün | 4. Gün | 5. Gün | 6. Gün | 7. Gün |            |                     |
| 25.07.2007-31.07.2007 | 39.4                 | 37.2   | 38.6   | 38.2   | 37.2   | 38.8   | 39.6   | 31.01.2007 | -10.0               |
| 20.07.2008-26.07.2008 | 38.0                 | 39.0   | 39.2   | 39.4   | 39.6   | 38.6   | 38.0   | 14.01.2008 | -12.2               |
| 07.07.2009-13.07.2009 | 33.9                 | 36.0   | 36.0   | 35.0   | 37.2   | 37.8   | 38.0   | 01.01.2009 | -9.2                |
| 27.07.2010-02.08.2010 | 38.8                 | 40.4   | 41.0   | 40.8   | 41.0   | 40.0   | 39.4   | 27.01.2010 | -10.0               |
| 27.07.2011-02.08.2011 | 39.0                 | 39.8   | 40.4   | 40.2   | 39.2   | 39.8   | 39.6   | 06.02.2011 | -6.1                |
| 23.07.2012-29.07.2012 | 40.2                 | 40.5   | 40.8   | 41.0   | 41.5   | 41.0   | 40.8   | 21.01.2012 | -7.9                |

Buna göre, son 22 yıldaki her yılın en yüksek 7 günlük sıcaklık periyotlarının aritmetik ortalaması (154 değer) alınarak yüksek hava sıcaklığı ve en düşük 1 günlük sıcaklık değerlerinin aritmetik ortalaması (22 değer) alınarak düşük hava sıcaklık değerleri belirlenmiş ve her iki sıcaklık değerinin standart sapması, Formül 5.1 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_{ort})^2}{n-1}} \quad (5.1)$$

Burada;

$\sigma$ : Standart sapma,

n: Örnekteki toplam gözlem sayısını,

$x_{ort}$ : Örnekteki toplam gözlem sayısının aritmetik ortalamasıdır.

Hesaplanan yüksek ve düşük hava sıcaklıklarının ortalama değeri ve standart sapması Tablo 5.2'de verilmiştir.

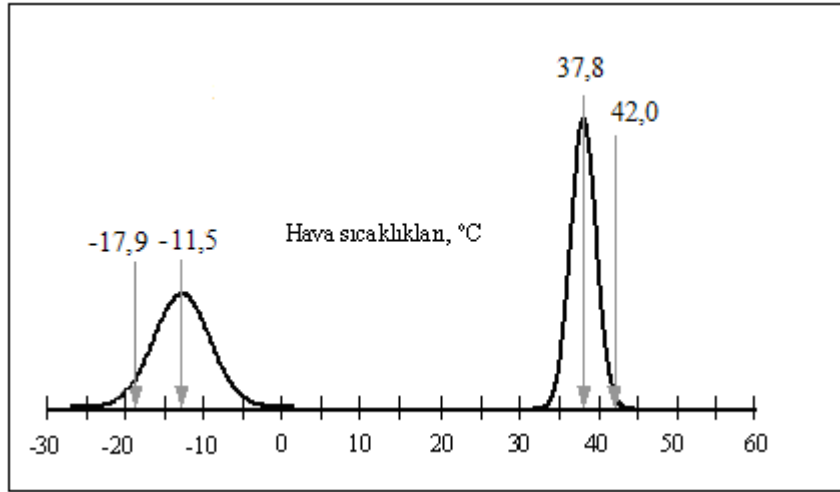
**Tablo 5.2.** Sıcaklık ortalamaları ve standart sapmaları

| Hesaplamalar   | Yüksek Sıcaklık (°C) | Düşük Sıcaklık (°C) |
|----------------|----------------------|---------------------|
| Ortalama       | 37,8                 | -11,5               |
| Standart Sapma | 2,1                  | 3,2                 |

22 yıllık süre içerisindeki ardı ardına 7 günlük maksimum hava sıcaklıklarının ortalaması ile en düşük 1 günlük sıcaklık değerlerinin ortalamasından %50 güvenilrlikte sıcaklık

değerleri belirlenmiştir. Sıcaklık değerlerinin standart sapmaları ( $\sigma$ ) kullanılarak %98 güvenilirlikte sıcaklık değerleri ( $\text{ortalama}+2\sigma$ ) belirlenmiştir. Şekil 5.1’de, uygulama bölgesine ait Tablo 5.2’de verilen düşük ve yüksek hava sıcaklık değerleri kullanılarak hazırlanmış temsili bir frekans dağılım eğrisi verilmiştir.

Ardı ardına gelen 7 günlük en yüksek hava sıcaklığı ortalaması  $37,8^{\circ}\text{C}$  ve standart sapması  $2,1^{\circ}\text{C}$  olan Malatya için ortalama sıcaklığa standart sapmanın iki katının ilavesiyle elde edilen  $42,0^{\circ}\text{C}$ ’lik sıcaklığa, çok sıcak geçen bir yaz mevsiminde ulaşılma ihtimali %2, dolayısıyla güvenilirlik % 98 olarak kabul edilmektedir. Benzer şekilde, ortalama en düşük sıcaklığı  $-11,5^{\circ}\text{C}$  ve standart sapması  $3,2^{\circ}\text{C}$  olan Malatya’da, çok soğuk bir kış mevsiminde de sıcaklığın  $-17,9^{\circ}\text{C}$  olması ihtimali %2, dolayısıyla güvenilirlik derecesi %98 olacaktır.



Şekil 5.1. Malatya için en düşük ve en yüksek hava sıcaklıklarının dağılımı

Superpave yönteminde kaplama sıcaklığı, bitümlü bağlayıcı sınıfının seçilmesinde kullanılacak tasarım sıcaklığı olarak alındığı için, Malatya ilindeki ortalama en yüksek 7 günlük hava sıcaklığı esas alınarak kaplama yüzeyinden 20 mm derinlikteki yüksek tasarım sıcaklığı ve en düşük bir günlük ortalama sıcaklık esas alınıp kaplama yüzeyindeki düşük tasarım sıcaklığı SHRP yöntemine göre %50 güvenilirlikte aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$T_{20\text{mm}} = ( T_{\text{havamax}} - 0,00618E^2 + 0,2289E + 42,2) \times (0,9545) - 17,78$$

$$T_{20\text{mm}} = ( 37,8 - 0,00618 \times 37,8^2 + 0,2289 \times 37,8 + 42,2) \times (0,9545) - 17,78 = 58,5^{\circ}\text{C}$$

$$T_{\text{min}} = T_{\text{havamin}} = -11,5^{\circ}\text{C} \text{ dir.}$$

Yukarıda SHRP yöntemi ile %50 güvenilirlik derecesinde hesaplanmış kaplama tasarım sıcaklıklarının %98 güvenilirlik değerleri aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$T_{20\text{mm}\%98} = T_{20\text{mm}\%50} + 2S_{\text{maks}} = 58,5 + 2 \times 2,1 = 62,7^\circ\text{C}$$

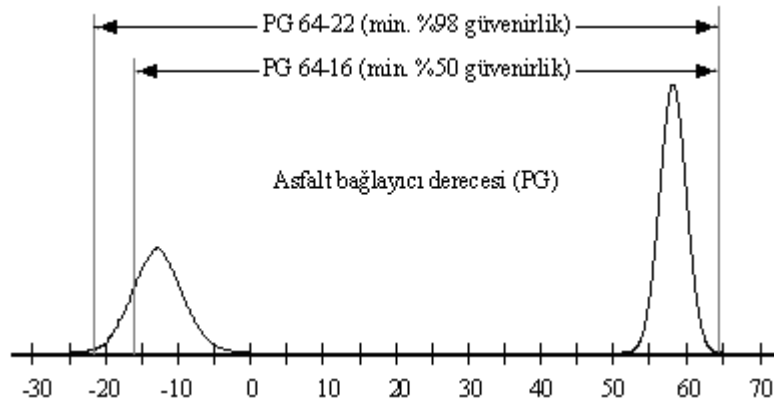
$$T_{\text{min}\%98} = T_{\text{min}\%50} + 2S_{\text{min}} = -11,5 + 2 \times (-3,2) = -17,9^\circ\text{C}$$

Yukarıda hava sıcaklıkları verilen uygulama bölgesinin hesaplanan tasarım sıcaklıklarının % 50 ve % 98 güvenilirlik değerleri Tablo 5.3'te verilmiştir.

**Tablo 5.3.** %50 ve %98 güvenilirlik değerlerinde hesaplanan kaplama tasarım sıcaklıkları

| % 50 Güvenilirlik ( $^\circ\text{C}$ ) |                   |                      |                  | % 98 Güvenilirlik ( $^\circ\text{C}$ ) |                   |                      |                  |
|--|-------------------|----------------------|------------------|--|-------------------|----------------------|------------------|
| $T_{\text{havamaks}}$                  | $T_{20\text{mm}}$ | $T_{\text{havamin}}$ | $T_{\text{min}}$ | $T_{\text{havamaks}}$                  | $T_{20\text{mm}}$ | $T_{\text{havamin}}$ | $T_{\text{min}}$ |
| 37,8                                   | 58,5              | -11,5                | -11,5            | 42,0                                   | 62,7              | -17,9                | -17,9            |

Tablo 5.3'te, SHRP yöntemine göre uygulama bölgesi için % 50 güvenilirlikte hesaplanan yüksek sıcaklık değeri  $58,5^\circ\text{C}$ , düşük sıcaklık değeri  $-11,5^\circ\text{C}$ 'dir. Bu güvenilirlik değeri için seçilecek olan bağlayıcı sınıfı PG 64–16 olacaktır. Aynı yöntemle % 98 güvenilirlik derecesi için hesaplanan yüksek sıcaklık değeri  $62,7^\circ\text{C}$ , düşük sıcaklık değeri  $-17,9^\circ\text{C}$  olduğundan uygulama bölgesi için bağlayıcı sınıfı PG 64–22 olarak seçilmiştir. Malatya için seçilen bu bağlayıcı sınıfının güvenilirlik derecesine göre sıcaklık dağılım grafiği Şekil 5.2'de verilmiştir.



**Şekil 5.2.** Malatya için bağlayıcı sınıfı seçimi

Malatya bölgesi için 20 yıllık tasarım trafiği tahmininin 0,3 – 3 milyon eşdeğer standart tek dingil yükü aralığında olduğu ve trafiğin ağır hızda ( $<50$  km/saat) seyrettiği kabul edilmiştir. Superpave yöntemine göre, tasarım trafiğinin 0,3 – 3 milyon eşdeğer standart tek dingil yükü aralığında ve trafiğin ağır hızda olması durumunda bağlayıcının yüksek sıcaklık derecesinin 1

derece arttırılması gerektiğinden Malatya ili için belirlenen tasarım kriterlerindeki bağlayıcı sınıfı PG 70–22 olarak seçilmiştir.

## 5.2. Bağlayıcı Deney Sonuçları

Çalışmada, iki farklı tür elastomer stiren-butadien-stiren (SBS D1101, SBS MD243) ile bir çeşit plastomer etilen vinil asetatın (EVA) bitümlü sıcak karışımların mühendislik özellikleri üzerindeki etkileri karşılaştırılmıştır. Yapılan çeşitli çalışmalarla polimer türü katkı maddelerinin bitümün kıvamını arttırdığı belirlenmiştir. Bu nedenle öncelikle penetrasyon derecesi yüksek olan B 160/220 sınıfı bitüm TÜPRAŞ rafinerisinden temin edilmiş ve bu bağlayıcının kullanılabilirliği EN 12591 standardına göre belirlenmiştir. Saf bağlayıcıya uygulanan deneylerden elde edilen sonuçlar ve şartname kriterleri Tablo 5.4’te verilmiştir.

**Tablo 5.4.** Saf bağlayıcı deney sonuçları

| Özellikler                                  | Standart   | Sonuç  | Şartname limiti |
|---|------------|--------|-----------------|
| Penetrasyon (0,1 mm, 100 g, 5 s)            | EN 1426    | 179    | 160–220         |
| Yumuşama Noktası (°C)                       | EN 1427    | 42,1   | 35 – 43         |
| Penetrasyon İndeksi (PI)                    | -          | 0,3453 | -               |
| Fraas Kırılma Noktası, (°C)                 | EN 12593   | -18,2  | < - 10          |
| Düktilite, (cm)                             | TS 119     | > 100  | > 100           |
| Özgül Ağırlık, (gr/cm <sup>3</sup> )        | TS 1087    | 1,020  | 1,0–1,1         |
| RTFOT Sonrası                               |            |        |                 |
| Özellikler                                  | Standart   | Sonuç  | Şartname limiti |
| Kütle Değişimi, en fazla, (%)               | EN 12607-1 | 0.94   | 1,0             |
| Penetrasyon, (25°C, 0,1mm)                  | EN 12607-1 | 84     | -               |
| Kalıcı Penetrasyon, en az, (%)              | EN 12607-1 | 46.9   | 37              |
| Yumuşama Noktası, en az, (°C)               | EN 1427    | 52,9   | 37              |
| Penetrasyon İndeksi (PI)                    | -          | 0,8927 | -               |
| Yumuşama Noktasındaki Artış, en fazla, (°C) | EN 1427    | 10.8   | 11              |

Kullanılacak katkı oranını belirlemek amacıyla bitüm ağırlığının %2, %3, %4 ve %5’i oranında SBS D1101 (SBS-D), SBS MD243 (SBS-M) ve EVA katkı maddeleri saf bitüme ilave edilerek karıştırılmıştır. Karıştırma prosedürü aşağıdaki şekilde işlenmiştir:

- Saf bitüm sıcaklığı 135°C olan bir etüv içerisinde bir saati geçmeyecek şekilde eriyinceye kadar bekletilmiştir.
- Yaklaşık 400 gr saf bitüm karıştırıcının haznesine aktarılmıştır. Belirlenen orana göre katkı maddesi hesaplanarak hazırlanmıştır.

- c. Karıştırıcı haznesi hot-plate'e yerleştirilmiş ve overhead karıştırıcı için ayarlamalar yapılarak karıştırma işlemine başlanmıştır.
- d. Karıştırma işleminde Şekil 5.3'te görülen dört bıçaklı karıştırıcı kullanılmıştır. Karıştırma işlemine başlandıktan sonra 5 dakika içerisinde katkı maddesi bitüme ilave edilmiştir.
- e. Karıştırma sıcaklığı olarak 180°C seçilmiştir. Saf bitüm ve katkı maddesi 1000 rpm. dönme hızında 1 saat süresince karıştırılmıştır.
- f. Hazırlanan modifiye bitüm cam behere aktarılmış ve hazırlanan her karışımla 6 adet 100 mm çapında BSK numunesi hazırlanmıştır. Karıştırmada kullanılan prosedür her seferinde aynı şekilde uygulanarak karıştırma prosedürünün deney sonuçlarına etki etmesi engellenmiştir.

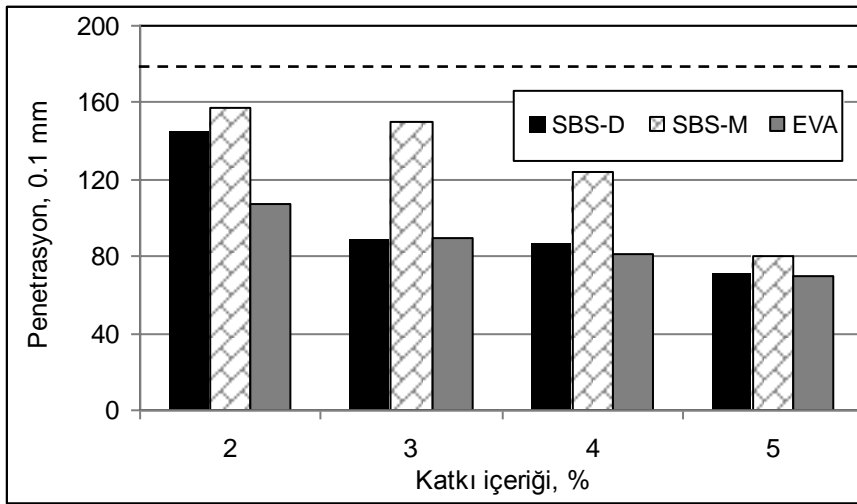


**Şekil 5.3.** Modifiye bitüm mikseri ve karıştırma başlığı

Hazırlanan modifiye bitümlere öncelikle penetrasyon, yumuşama noktası, 135°C ve 165°C sıcaklıkta dönel viskozimetre ve bağlayıcıların performans seviyesini belirlemek amacıyla 58, 64, 70 ve 76°C sıcaklıklarda dinamik kayma reometresi deneyleri uygulanmıştır. Modifiye bitümlere uygulanan penetrasyon ve yumuşama noktası deneylerinden elde edilen sonuçlar Tablo 5.5'te, ayrıca penetrasyon değerlerinin değişimi Şekil 5.4'te, yumuşama noktası değerlerinin değişimi Şekil 5.5'te ve penetrasyon indeksi değerleri Şekil 5.6'da verilmiştir. Saf bağlayıcının değerleri şekillerde kesikli çizgi ile gösterilmiştir.

**Tablo 5.5.** Penetrasyon ve yumuşama noktası deney sonuçları

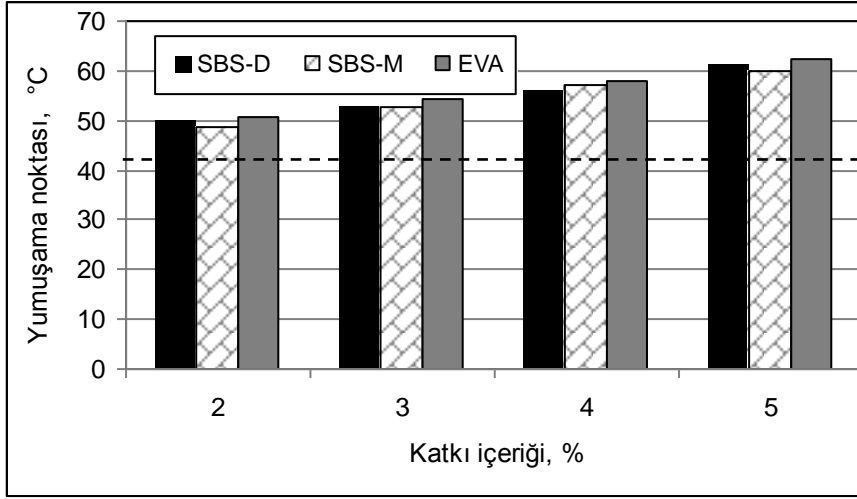
| Katkı türü | Katkı İçeriği | Deney Adı                       |                       |                     |
|------------|---------------|---------------------------------|-----------------------|---------------------|
|            |               | Penetrasyon (mm <sup>-1</sup> ) | Yumuşama noktası (°C) | Penetrasyon indeksi |
| Saf        |               | 179                             | 42,1                  | 0,3453              |
| SBS-D 1101 | 2             | 145                             | 50,0                  | 2,0656              |
|            | 3             | 89                              | 52,6                  | 0,9856              |
|            | 4             | 87                              | 55,9                  | 1,7102              |
|            | 5             | 71                              | 61,4                  | 2,2538              |
| SBS-MD 243 | 2             | 157                             | 48,8                  | 2,0691              |
|            | 3             | 150                             | 52,8                  | 2,9758              |
|            | 4             | 124                             | 57,1                  | 3,2399              |
|            | 5             | 81                              | 59,9                  | 2,3414              |
| EVA        | 2             | 107                             | 50,6                  | 1,0846              |
|            | 3             | 89                              | 54,2                  | 1,3997              |
|            | 4             | 82                              | 58,1                  | 1,9969              |
|            | 5             | 70                              | 62,3                  | 2,3844              |



**Şekil 5.4.** Penetrasyon değerlerinin katkı türü ve içeriği ile değişimi

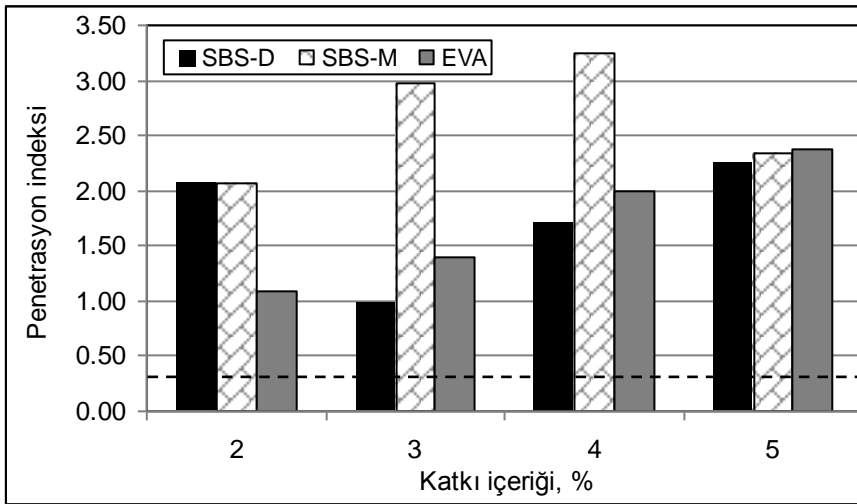
Şekil 5.4'te görüldüğü üzere katkı içeriği arttıkça penetrasyon değerleri azalmıştır. Katkılar içerisinde penetrasyon değerleri üzerinde en etkin katkı maddesinin EVA olduğu, en az olan etkili olan katkı türünün ise SBS-M olduğu belirlenmiştir. Bitümün ağırlığınca %5 oranında SBS-D kullanılması durumunda saf bitüme göre penetrasyon değeri %60,5 SBS-M kullanılması durumunda %55,1 ve EVA kullanılması durumunda ise %61,2 oranında azaldığı tespit edilmiştir.





Şekil 5.5. Yumuşama noktası değerlerinin katkı türü ve içeriği ile değişimi

Şekilden de görüldüğü gibi katkı içeriği arttıkça yumuşama noktası değerleri artmaktadır. Katkı türleri içerisinde yumuşama noktası değerleri üzerinde en etkin katkının EVA olduğu belirlenmiştir. %2 ve %5 katkı içeriklerinde etkinliği en az olan katkı türünün SBS-M olduğu, %3 ve %4 katkı içeriklerinde ise etkinliği en az olan katkı türünün de SBS-D olduğu tespit edilmiştir. Bitümün ağırlığına %5 oranında SBS-D kullanılması durumunda saf bitüme göre yumuşama noktası değeri %45,7 SBS-M kullanılması durumunda %42,2 ve EVA kullanılması durumunda ise %48,0 oranında artmaktadır.



Şekil 5.6. Penetrasyon indeksi değerlerinin katkı türü ve içeriği ile değişimi

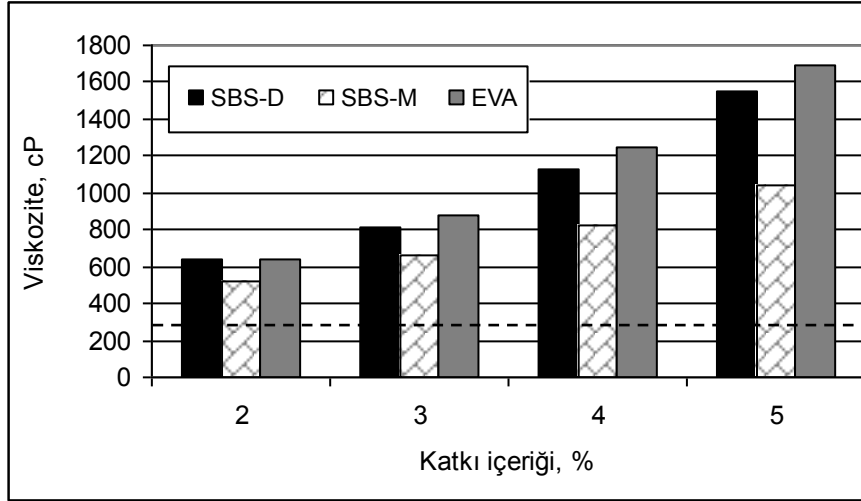
Şekil 5.6'da görülen penetrasyon indeksi değerleri incelendiğinde EVA içeren modifiye bağlayıcılarda katkı içeriği arttıkça penetrasyon indeksi değerlerinin arttığı belirlenmektedir.

Bütün bağlayıcıların penetrasyon indeksi değerlerinin saf bitümden yüksek çıkması, katkı kullanımı ile bağlayıcıların ısıya karşı hassasiyetlerinin azaldığını göstermektedir.

Viskozite deneylerinden elde edilen sonuçlar Tablo 5.6’da verilmiştir. 135°C ve 165°C sıcaklıktaki bağlayıcıların viskozite değerleri Şekil 5.7 ve 5.8’de verilmiştir. Saf bağlayıcının viskozite değerleri kesikli çizgi ile gösterilmiştir.

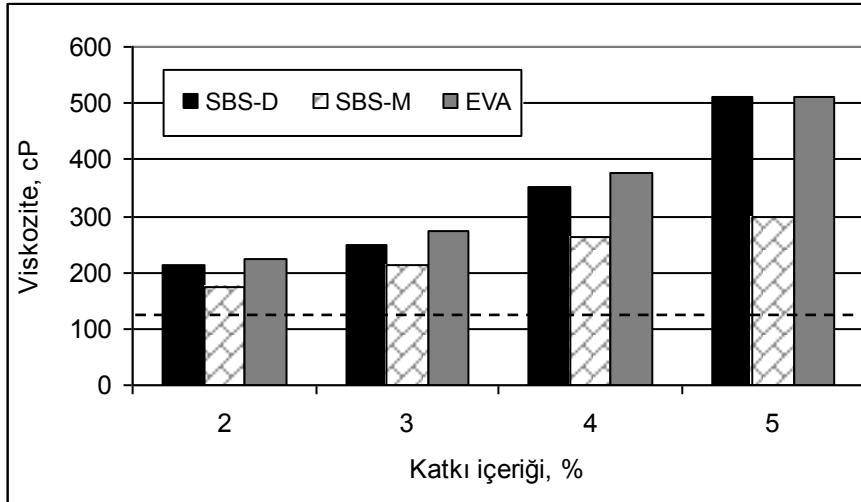
**Tablo 5.6.** Dönel viskozimetre deney sonuçları

| Özellik   | Katkı türü        | Katkı içeriği (%) |         |         |         |         |
|---|-------------------|-------------------|---------|---------|---------|---------|
|   |                   | 0                 | 2       | 3       | 4       | 5       |
| 135°C’deki viskozite değeri (cP)                        | SBS Kraton D 1101 | 275,0             | 637,5   | 812,5   | 1125,0  | 1550,0  |
| 165°C’deki viskozite değeri (cP)                        |                   | 112,5             | 212,5   | 250,0   | 350,0   | 512,5   |
| Modifikasyon indisi (135°C) ( $\eta_{PMB}/\eta_{saf}$ ) |                   | 1,00              | 2,32    | 2,95    | 4,09    | 5,64    |
| Modifikasyon indisi (165°C) ( $\eta_{PMB}/\eta_{saf}$ ) |                   | 1,00              | 1,89    | 2,22    | 3,11    | 4,56    |
| Karıştırma sıcaklığı aralığı, °C                        |                   | 151-158           | 167-169 | 168-170 | 171-173 | 173-174 |
| Sıkıştırma sıcaklığı aralığı, °C                        |                   | 129-140           | 158-162 | 162-165 | 167-169 | 170-172 |
| 135°C’deki viskozite değeri (cP)                        | SBS MD-243        | 275,0             | 525,0   | 662,5   | 825,0   | 1038,0  |
| 165°C’deki viskozite değeri (cP)                        |                   | 112,5             | 175,0   | 212,5   | 262,5   | 300,0   |
| Modifikasyon indisi (135°C) ( $\eta_{PMB}/\eta_{saf}$ ) |                   | 1,00              | 1,91    | 2,41    | 3,00    | 3,77    |
| Modifikasyon indisi (165°C) ( $\eta_{PMB}/\eta_{saf}$ ) |                   | 1,00              | 1,56    | 1,89    | 2,33    | 2,67    |
| Karıştırma sıcaklığı aralığı, °C                        |                   | 151-158           | 164-167 | 167-169 | 169-171 | 173-174 |
| Sıkıştırma sıcaklığı aralığı, °C                        |                   | 129-140           | 153-159 | 159-163 | 163-166 | 170-172 |
| 135°C’deki viskozite değeri (cP)                        | EVA               | 275,0             | 635,5   | 875,0   | 1250,0  | 1688,0  |
| 165°C’deki viskozite değeri (cP)                        |                   | 112,5             | 225,0   | 275,0   | 375,0   | 512,5   |
| Modifikasyon indisi (135°C) ( $\eta_{PMB}/\eta_{saf}$ ) |                   | 1,00              | 2,31    | 3,18    | 4,55    | 6,14    |
| Modifikasyon indisi (165°C) ( $\eta_{PMB}/\eta_{saf}$ ) |                   | 1,00              | 2,00    | 2,44    | 3,33    | 4,56    |
| Karıştırma sıcaklığı aralığı, °C                        |                   | 151-158           | 168-171 | 169-171 | 171-173 | 173-174 |
| Sıkıştırma sıcaklığı aralığı, °C                        |                   | 129-140           | 159-163 | 163-166 | 167-169 | 170-172 |



Şekil 5.7. Bağlayıcıların 135°C sıcaklıktaki viskozite değerleri

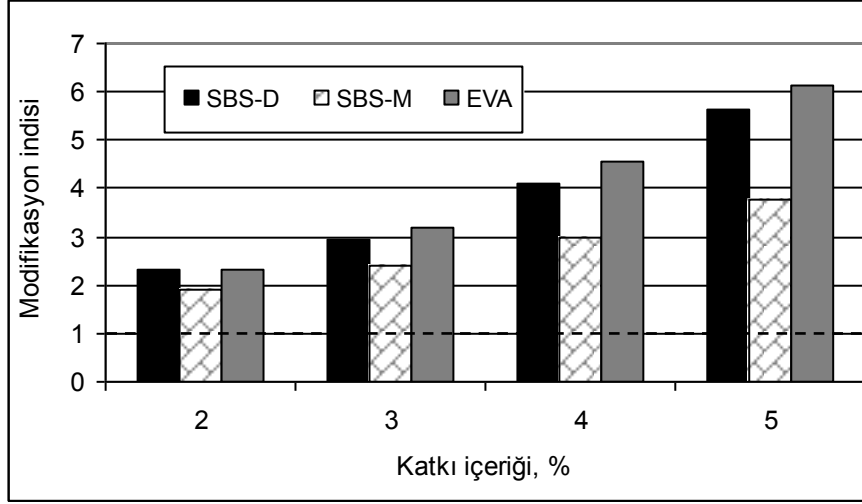
Şekil 5.7’de görüldüğü üzere katkı içeriği arttıkça bağlayıcıların 135°C sıcaklıktaki viskozite değerleri artmaktadır. Katkı türleri karşılaştırıldığında viskozite değerini en fazla arttıran katkı türünün EVA olduğu, en düşük oranda arttıran katkının ise SBS-M olduğu belirlenmiştir. Bitümün ağırlığına %5 oranında EVA kullanılması durumunda viskozite değeri saf bitüme göre 6,14 kat, SBS-M kullanılması durumunda 3,78 kat ve SBS-D kullanılması durumunda ise 5,64 kat artmaktadır.



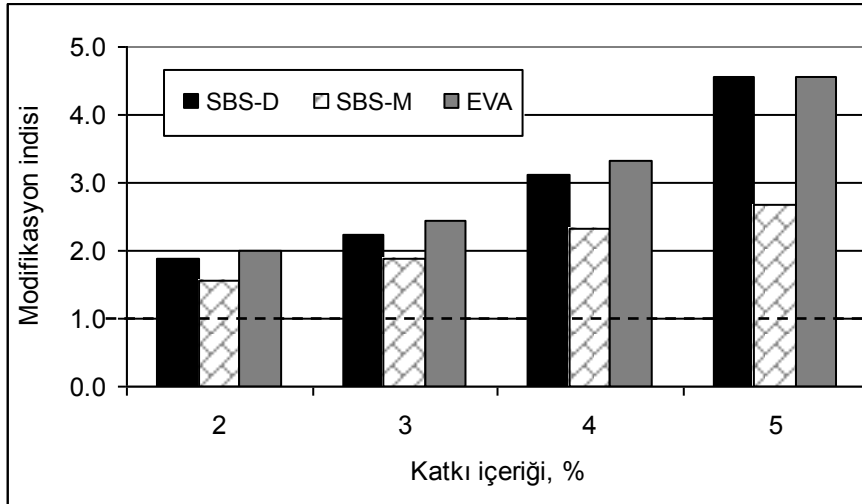
Şekil 5.8. Bağlayıcıların 165°C sıcaklıktaki viskozite değerleri

Şekil 5.8’de görüldüğü üzere 135°C sıcaklıkta olduğu gibi 165°C sıcaklıkta da katkı içeriği arttıkça viskozite değerleri artmaktadır. Katkı türleri karşılaştırıldığında viskozite değerini en fazla arttıran katkı türünün EVA olduğu, en düşük oranda arttıran katkının ise

SBS-M olduğu görülmektedir. Bitüm ağırlığının %5'i oranında EVA kullanılması durumunda viskozite değeri 4,56 kat, SBS-M kullanılması durumunda 2,67 kat ve SBS-D kullanılması durumunda ise 4,56 kat artmaktadır. 135°C ve 165°C sıcaklıktaki bağlayıcıların viskozite modifikasyon indisi değerleri Şekil 5.9 ve 5.10'da verilmiştir. Modifikasyon indisi değerleri modifiye bitümlerin viskozite değerlerinin saf bağlayıcının aynı sıcaklıktaki viskozite değerlerine oranlanması ile elde edilmektedir.



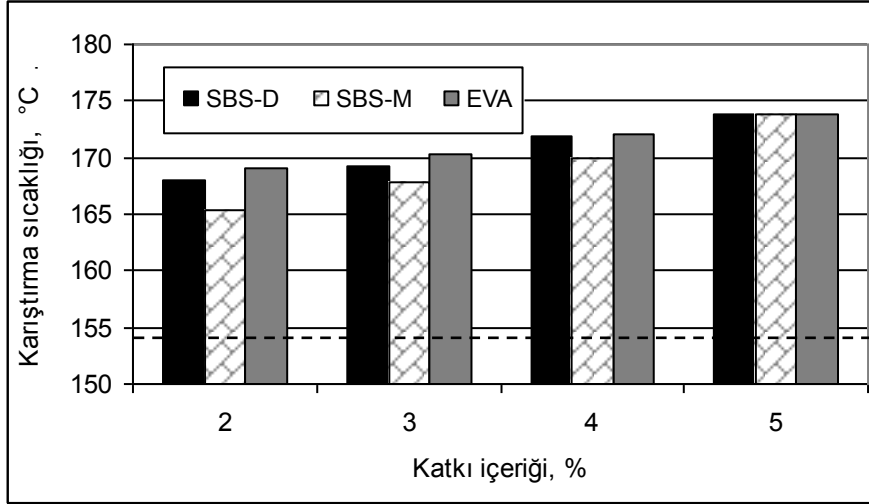
Şekil 5.9. Bağlayıcıların 135°C sıcaklıktaki modifikasyon indisleri



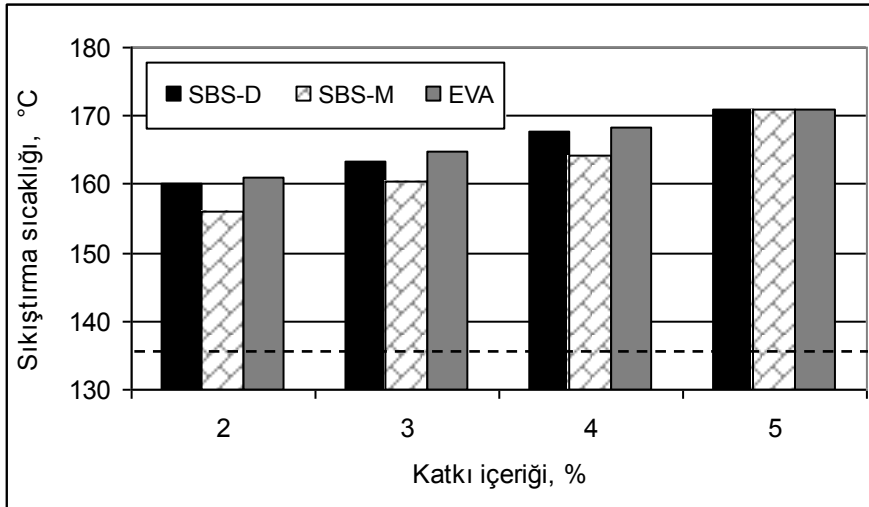
Şekil 5.10. Bağlayıcıların 165°C sıcaklıktaki modifikasyon indisleri

Şekil 5.9 ve 5.10'da görüldüğü üzere her iki sıcaklıkta da katkı içeriği arttıkça modifikasyon indisi değerlerinin arttığı dolayısıyla katkıların etkinliğinin arttığı belirlenmiştir. Viskozite değerlerinde olduğu gibi modifikasyon indeksi değerlerinden de en etkin katkının EVA olduğu, viskozite değerleri üzerinde etkinliği en az olan katkının ise SBS-M olduğu

görülmektedir. Bağlayıcıların agregayla karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları Şekil 5.11 ve 5.12’de verilmiştir. Şekillerdeki karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları Tablo 5.6’da görülen değerlerin ortalamasından elde edilmiştir.



Şekil 5.11. Bağlayıcıların agregayla karıştırma sıcaklıkları



Şekil 5.12. Karışımların sıkıştırma sıcaklıkları

Bağlayıcıların agregaya karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları incelendiğinde %2–4 katkı oranlarında EVA katkı maddesi ile hazırlanan bağlayıcıların daha yüksek sıcaklığa ihtiyaç duyduğu, SBS-M katkı maddesi ile hazırlanan bağlayıcıların ise daha düşük sıcaklıklara ihtiyaç duyduğu belirlenmiştir. %5 katkı içeriğinde ise bütün bağlayıcıların aynı karıştırma ve sıkıştırma sıcaklığına ihtiyaç duyduğu tespit edilmiştir. Orijinal bağlayıcılara uygulanan DSR deneylerinden elde edilen sonuçlar Tablo 5.7’de verilmiştir.

**Tablo 5.7.** Orijinal bağlayıcıların DSR deney sonuçları

| Katkı türü        | Katkı içeriği (%) |                  | Deney sıcaklığı (°C) |       |       |       |       | PG   |      |
|-------------------|-------------------|------------------|----------------------|-------|-------|-------|-------|------|------|
|                   |                   |                  | 58                   | 64    | 70    | 76    | 82    |      |      |
| -                 | 0                 | G*/sin δ (Pa)    | 1258                 | 574   |       |       |       | 58-Y |      |
|                   |                   | Faz açısı (δ, °) | 81,04                | 83,45 |       |       |       |      |      |
| SBS Kraton D 1101 | 2                 | G*/sin δ (Pa)    | 2456                 | 1232  | 638   |       |       | 64-Y |      |
|                   |                   | Faz açısı (δ, °) | 76,04                | 78,36 | 80,23 |       |       |      |      |
|                   | 3                 | G*/sin δ (Pa)    | 3817                 | 1863  | 941   |       |       | 64-Y |      |
|                   |                   | Faz açısı (δ, °) | 70,84                | 75,62 | 78,99 |       |       |      |      |
|                   | 4                 | G*/sin δ (Pa)    | 4890                 | 2539  | 1326  | 735   |       | 70-Y |      |
|                   |                   | Faz açısı (δ, °) | 69,51                | 72,77 | 74,91 | 77,63 |       |      |      |
|                   | 5                 | G*/sin δ (Pa)    | 7844                 | 3971  | 2348  | 1189  | 583   | 76-Y |      |
|                   |                   | Faz açısı (δ, °) | 67,35                | 69,81 | 71,31 | 74,07 | 77,96 |      |      |
|                   | SBS MD-243        | 2                | G*/sin δ (Pa)        | 1816  | 937   | 488   |       |      | 58-Y |
|                   |                   |                  | Faz açısı (δ, °)     | 73,75 | 76,21 | 78,77 |       |      |      |
| 3                 |                   | G*/sin δ (Pa)    | 2817                 | 1412  | 729   |       |       | 64-Y |      |
|                   |                   | Faz açısı (δ, °) | 67,41                | 71,12 | 75,33 |       |       |      |      |
| 4                 |                   | G*/sin δ (Pa)    | 4204                 | 2245  | 1183  | 633   |       | 70-Y |      |
|                   |                   | Faz açısı (δ, °) | 67,08                | 67,05 | 68,74 | 72,21 |       |      |      |
| 5                 |                   | G*/sin δ (Pa)    | 5823                 | 3144  | 1681  | 909   |       | 70-Y |      |
|                   |                   | Faz açısı (δ, °) | 63,45                | 65,40 | 66,51 | 70,06 |       |      |      |
| EVA               |                   | 2                | G*/sin δ (Pa)        | 2306  | 1153  | 602   |       |      | 64-Y |
|                   |                   |                  | Faz açısı (δ, °)     | 78,28 | 80,53 | 81,89 |       |      |      |
|                   | 3                 | G*/sin δ (Pa)    | 3684                 | 1826  | 889   |       |       | 64-Y |      |
|                   |                   | Faz açısı (δ, °) | 73,55                | 77,15 | 80,36 |       |       |      |      |
|                   | 4                 | G*/sin δ (Pa)    | 4534                 | 3012  | 1512  | 739   |       | 70-Y |      |
|                   |                   | Faz açısı (δ, °) | 71,56                | 73,97 | 76,25 | 79,97 |       |      |      |
|                   | 5                 | G*/sin δ (Pa)    | 5511                 | 3647  | 2302  | 1260  | 624   | 76-Y |      |
|                   |                   | Faz açısı (δ, °) | 69,81                | 73,04 | 73,64 | 74,90 | 78,82 |      |      |

Tablo 5.7’de görüldüğü üzere 58°C sıcaklıkta bütün bağlayıcılar Superpave şartname kriterini (1000 Pa) sağlamaktadır. Saf bitüm ve %2 SBS-M içeren bağlayıcıların en yüksek performans seviyesi değerlerinin 58 olduğu belirlenmiştir. %2 ve %3 SBS-D, %3 SBS-M ve %2 ve %3 EVA içeren modifiye bağlayıcılar en fazla 64°C sıcaklıkta şartname kriterini sağlamıştır. %4 SBS-D, SBS-M ve EVA içeren modifiye bağlayıcılar 70°C sıcaklıkta şartname kriterini sağlamıştır. %5 SBS-M içeren modifiye bitüm 70°C sıcaklıkta şartname kriterini sağlarken, %5 SBS-D ve EVA içeren modifiye bağlayıcılar ise 76°C sıcaklıkta en son 1000 Pa koşulunu sağlamıştır. Faz açısı değerleri incelendiğinde polimer modifiye bitümler içerisinde en düşük faz açısı değerlerine SBS-M modifiyeli bitümlerin, en yüksek faz açısı değerlerine ise EVA modifiyeli bitümlerin sahip olduğu belirlenmiştir. RTFOT ile kısa dönem yaşlandırılmış bağlayıcılara en son şartname kriterini sağladığı sıcaklıklarda uygulanan DSR deneylerinden elde edilen sonuçlar Tablo 5.8’de verilmiştir.

**Tablo 5.8.** Kısa dönem yaşlandırılmış bağlayıcıların DSR deney sonuçları

| Katkı türü        | Katkı içeriği (%) | Deney sıcaklığı (°C)      |                           |       |       |       | PG |      |      |
|-------------------|-------------------|---------------------------|---------------------------|-------|-------|-------|----|------|------|
|                   |                   | 58                        | 64                        | 70    | 76    | 82    |    |      |      |
| -                 | 0                 | G*/sin $\delta$ (Pa)      | 7862                      | -     | -     | -     | -  | 58-Y |      |
|                   |                   | Faz açısı ( $\delta$ , °) | 70,52                     | -     | -     | -     | -  |      |      |
| SBS Kraton D 1101 | 2                 | G*/sin $\delta$ (Pa)      | -                         | 5670  | -     | -     | -  | 64-Y |      |
|                   |                   | Faz açısı ( $\delta$ , °) | -                         | 69,74 | -     | -     | -  |      |      |
|                   | 3                 | G*/sin $\delta$ (Pa)      | -                         | 6549  | -     | -     | -  | 64-Y |      |
|                   |                   | Faz açısı ( $\delta$ , °) | -                         | 68,03 | -     | -     | -  |      |      |
|                   | 4                 | G*/sin $\delta$ (Pa)      | -                         | -     | 5599  | -     | -  | 70-Y |      |
|                   |                   | Faz açısı ( $\delta$ , °) | -                         | -     | 66,60 | -     | -  |      |      |
|                   | 5                 | G*/sin $\delta$ (Pa)      | -                         | -     | -     | 5288  | -  | 76-Y |      |
|                   |                   | Faz açısı ( $\delta$ , °) | -                         | -     | -     | 65,92 | -  |      |      |
|                   | SBS MD-243        | 2                         | G*/sin $\delta$ (Pa)      | 6134  | -     | -     | -  | -    | 58-Y |
|                   |                   |                           | Faz açısı ( $\delta$ , °) | 65,51 | -     | -     | -  | -    |      |
| 3                 |                   | G*/sin $\delta$ (Pa)      | -                         | 5766  | -     | -     | -  | 64-Y |      |
|                   |                   | Faz açısı ( $\delta$ , °) | -                         | 64,70 | -     | -     | -  |      |      |
| 4                 |                   | G*/sin $\delta$ (Pa)      | -                         | -     | 5171  | -     | -  | 70-Y |      |
|                   |                   | Faz açısı ( $\delta$ , °) | -                         | -     | 64,00 | -     | -  |      |      |
| 5                 |                   | G*/sin $\delta$ (Pa)      | -                         | -     | 7248  | -     | -  | 70-Y |      |
|                   |                   | Faz açısı ( $\delta$ , °) | -                         | -     | 58,21 | -     | -  |      |      |
| EVA               |                   | 2                         | G*/sin $\delta$ (Pa)      | -     | 6272  | -     | -  | -    | 64-Y |
|                   |                   |                           | Faz açısı ( $\delta$ , °) | -     | 72,04 | -     | -  | -    |      |
|                   | 3                 | G*/sin $\delta$ (Pa)      | -                         | 6980  | -     | -     | -  | 64-Y |      |
|                   |                   | Faz açısı ( $\delta$ , °) | -                         | 69,86 | -     | -     | -  |      |      |
|                   | 4                 | G*/sin $\delta$ (Pa)      | -                         | -     | 6862  | -     | -  | 70-Y |      |
|                   |                   | Faz açısı ( $\delta$ , °) | -                         | -     | 66,50 | -     | -  |      |      |
|                   | 5                 | G*/sin $\delta$ (Pa)      | -                         | -     | -     | 6437  | -  | 76-Y |      |
|                   |                   | Faz açısı ( $\delta$ , °) | -                         | -     | -     | 66,03 | -  |      |      |

Tablo 5.8’de görüldüğü üzere kısa dönem yaşlandırılmış bağlayıcıların hepsi RTFOT sonrası DSR şartname kriteri olan minimum 2200 Pa değerini sağlamaktadır. Karışım deneylerinde kullanılacak katkı oranlarını belirlerken uygulama bölgesi olarak seçilen Malatya ili için gerekli olan PG 70–22 bağlayıcısı hedef alınmıştır. Tablo 5.7 ve Tablo 5.8 incelendiğinde %4 oranında SBS-D, SBS-M ve EVA içeren modifiye bağlayıcıların ayrıca %5 oranında SBS-M içeren bağlayıcının PG 70-Y şartını sağladığı tespit edilmiştir. Aynı katkı oranının bitümlü sıcak karışımlar üzerindeki etkisini değerlendirmek amacıyla bütün katkı türlerinden %4 oranında kullanılmasına karar verilmiştir. Bölümümüzde PAV deney aleti bulunmadığından sadece B 160/220 saf bağlayıcısı ve %4 oranında SBS-D, SBS-M ve EVA içeren bağlayıcılar PAV deneyine tabi tutulmuştur. PAV kalıntılarına uygulanan BBR deneylerinden elde edilen sonuçlar Tablo 5.9’da, DSR deney sonuçları ise Tablo 5.10’da

verilmiştir. Tablo 5.9’da görüldüğü üzere bütün bağlayıcılar -30°C sıcaklıkta m-değeri sınırı olan 0,300 değerini sağlayamamıştır. B 160/220 saf bitümü, %4 oranında SBS-D ve SBS-M bitümü ile hazırlanan karışımlar -24°C sıcaklıkta, %4 oranında EVA içeren bağlayıcı ise -18°C sıcaklıkta m-değeri şartname kriterini sağlamıştır. Tablo 5.10’da görüldüğü üzere PAV deney aleti ile uzun dönem yaşlandırılmış bütün bağlayıcılar DSR şartname kriterini sağlamıştır.

**Tablo 5.9.** BBR deney sonuçları

| Katkı türü        | Katkı içeriği (%) | Parametre            | Deney sıcaklığı |       |       |
|-------------------|-------------------|----------------------|-----------------|-------|-------|
|                   |                   |                      | -18             | -24   | -30   |
| -                 | 0                 | m-değeri             | -               | 0,309 | 0,266 |
|                   |                   | Sünme sertliği (MPa) | -               | 108,3 | 140,9 |
| SBS Kraton D 1101 | 4                 | m-değeri             | -               | 0,314 | 0,221 |
|                   |                   | Sünme sertliği (MPa) | -               | 144,7 | 242,6 |
| SBS MD-243        |                   | m-değeri             |                 | 0,325 | 0,291 |
|                   |                   | Sünme sertliği (MPa) |                 | 98,5  | 121,9 |
| EVA               |                   | m-değeri             | 0,306           | 0,277 | -     |
|                   |                   | Sünme sertliği (MPa) | 131,3           | 160,6 | -     |

**Tablo 5.10.** Uzun dönem yaşlandırılmış bağlayıcıların DSR deney sonuçları

| Katkı türü        | Katkı içeriği (%) | Parametre                         | Deney sıcaklığı |      |      |
|-------------------|-------------------|-----------------------------------|-----------------|------|------|
|                   |                   |                                   | 16              | 22   | 25   |
| -                 | 0                 | G*.sin δ<br>(Pa.10 <sup>6</sup> ) | 1,83            | -    | -    |
| SBS Kraton D 1101 | 4                 |                                   | -               | 1,69 | -    |
| SBS MD-243        |                   |                                   | -               | 1,52 | -    |
| EVA               |                   |                                   | -               | -    | 1,34 |

PG 58-Y ve PG 70-Y bağlayıcılarına ait Superpave şartname kriterleri Tablo 5.11’de verilmiştir. Tablo 5.11’e göre kullanılan bağlayıcıların performans seviyeleri Tablo 5.12’de verilmiştir. Polimerlerle modifiye edilen bağlayıcıların yüksek sıcaklık performans seviyeleri aynı fakat EVA modifiyeli bağlayıcının performans seviyesi düşük sıcaklık değeri diğerlerinden farklı olarak “-28” olarak belirlenmiştir. Bu durum aynı oranda katkı içeren EVA modifiyeli bağlayıcıların düşük ısı dayanımlarının SBS-D ve SBS-M modifiyeli bağlayıcılara göre daha düşük olacağını göstermektedir. Fakat çalışmada katkı oranları sabit tutularak katkı türlerinin etkileri karşılaştırmak istendiğinden bütün katkı maddelerinden %4 oranında kullanılmasına karar verilmiştir.



**Tablo 5.11.** PG 58-Y ve PG 70-Y Superpave bağlayıcı şartnamesi [90]

| PERFORMANS SINIFI  | PG 58-       |       |       |       |       | PG 70- |       |       |       |       |       |
|--|--------------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
|  | 16           | 22    | 28    | 34    | 40    | 10     | 16    | 22    | 28    | 34    | 40    |
| Ortalama 7 Günlük Maksimum Kaplama Tasarım Sıcaklığı, °C                               | < 58         |       |       |       |       | < 70   |       |       |       |       |       |
| Minimum Kaplama Tasarım Sıcaklığı, °C  | > -16        | > -22 | > -28 | > -34 | > -40 | > -10  | > -16 | > -22 | > -28 | > -34 | > -40 |
| <b>ORJİNAL BAĞLAYICI</b>   |              |       |       |       |       |        |       |       |       |       |       |
| Parlama Noktası, T48, Minimum, °C  | 230          |       |       |       |       |        |       |       |       |       |       |
| Viskozite, ASTM D4402; Maksimum 3 Pa.s , Test Sıcaklığı, °C                            | 135          |       |       |       |       |        |       |       |       |       |       |
| Dinamik Kayma, TP5, G*/sinδ, minimum, 1.00 kPa, 10 rad/s , Test sıcaklığı, °C          | 58           |       |       |       |       | 70     |       |       |       |       |       |
| <b>DÖNEL İNCE FİLM HALİNDE ISITMA DENEYİ (RTFOT) KALINTISI</b>                         |              |       |       |       |       |        |       |       |       |       |       |
| Ağırlık Kaybı, Maksimum, %   | 1,00         |       |       |       |       |        |       |       |       |       |       |
| Dinamik Kayma, TP5, G*/sinδ, minimum, 2.20 kPa, 10 rad/s, Test sıcaklığı, °C           | 58           |       |       |       |       | 70     |       |       |       |       |       |
| <b>BASINÇLI YAŞLANDIRMA ALETİ (PAV) KALINTISI</b>                                      |              |       |       |       |       |        |       |       |       |       |       |
| PAV Deney Sıcaklığı, °C  | 100          |       |       |       |       |        |       |       |       |       |       |
| Dinamik Kayma, TP5, G*/sinδ, maksimum, 5000 kPa, 10 rad/s, Test sıcaklığı, °C          | 25           | 22    | 19    | 16    | 13    | 34     | 31    | 28    | 25    | 22    | 19    |
| Fiziksel Sertleşme,  | <b>Rapor</b> |       |       |       |       |        |       |       |       |       |       |
| Sünme Sertliği, TP1, S, Maksimum, 300 MPa, m-değeri, minimum 0.300, Test sıcaklığı, °C | - 6          | - 12  | - 18  | - 24  | - 30  | 0      | - 6   | - 12  | - 18  | - 24  | - 30  |
| Direkt Çekme, TP3, minimum, %1.0 Test sıcaklığı, °C                                    | - 6          | - 12  | - 18  | - 24  | - 30  | 0      | - 6   | - 12  | - 18  | - 24  | - 30  |

**Tablo 5.12.** Bağlayıcıların Superpave performans seviyeleri

| Katkı türü        | Katkı içeriği (%) | Performans Seviyesi |
|-------------------|-------------------|---------------------|
| -                 | 0                 | 58-34               |
| SBS Kraton D 1101 | 4                 | 70-34               |
| SBS MD-243        |                   | 70-34               |
| EVA               |                   | 70-28               |

### 5.3. Agregaların Fiziksel Özellikleri

Çalışmada agrega olarak Elazığ Karayazı Bölgesi'nden temin edilen kalker türü kırmataş malzemesi kullanılmıştır. Deneylede agrega karışımının No. 4 elek üzerinde kalan kaba kısmı yıkanarak tozdan arındırılmış olarak kullanılmıştır. Çalışmada, maksimum tane boyutu 19 mm, nominal maksimum tane boyutu 12,5 mm olan Superpave agrega gradasyonu seçilmiştir. Karışımlarda kullanılacak agrega yığınının mutabakat ve kaynak özellikleri tespit edilerek, tasarım trafiği (15 milyon) ve kaplamanın kalınlığına (<100 mm) bağlı olarak şartname kriterleri ile karşılaştırılmış ve bu kriterlerin sağlandığı tespit edilmiştir. Karışımlarda kullanılan kalker agregasının fiziksel özellikleri aşağıda Tablo 5.13'te verilmiştir.

**Tablo 5.13.** Kullanılan agreganın fiziksel özellikleri

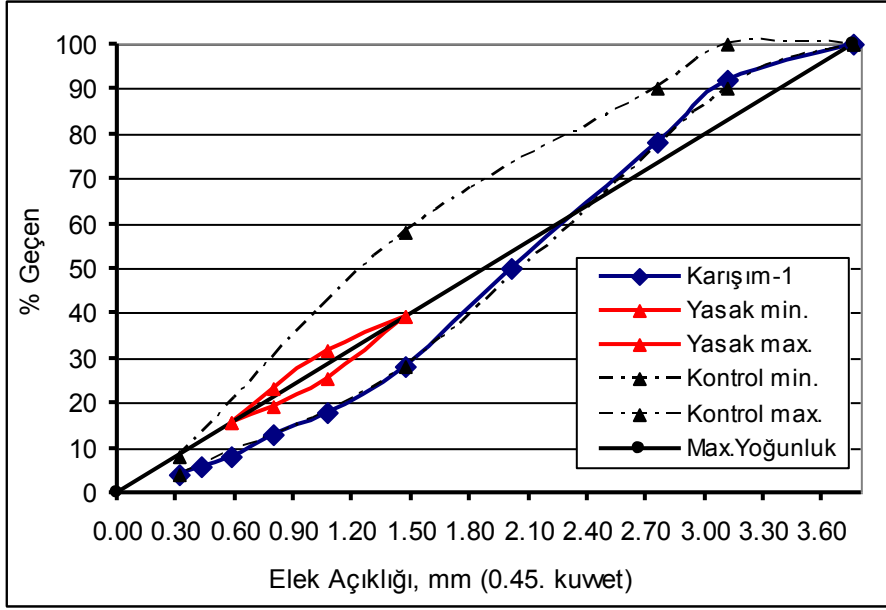
| Özellikler   | Deney Standardı | Mineral Agrega |      |        | Şartname Sınırı |
|--|-----------------|----------------|------|--------|-----------------|
|  |                 | Kaba           | İnce | Filler |                 |
| Dayanıklılık (Los Angeles Aşınma kaybı), (%)                     | ASTM C-131      | 27,8           | -    | -      | Maks. 35        |
| Aşınma kaybı (Mikro deval), (%)                                  | ASTM D 6928     | 13,6           |      |        | Maks. 15        |
| Sağlamlık (Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ile Donma kaybı), (%) | ASTM C-88       | 5,8            | -    | -      | Maks. 10        |
| Kaba Agrega Köşeliliği, (%)                                      | ASTM D-5821     | 98/96          | -    | -      | Min. 95/90      |
| İnce Agrega Köşeliliği, (%)                                      | AASHTO T304     | -              | 54   | -      | Min. 45         |
| Yassı ve Uzun Daneler, (%)                                       | ASTM D-4791     | 3              | -    | -      | Maks. 10        |
| Kil İçeriği, (Kum Eşdeğerlik), (%)                               | AASHTO T176     | -              | 60   |        | Min. 45         |
| Zararlı Maddeler, (%)  | ASTM C-142      | Bulunmamıştır  |      |        | Maks. 2         |

#### 5.4. Superpave Yöntemine Göre Karışımların Hacimsel Tasarımı

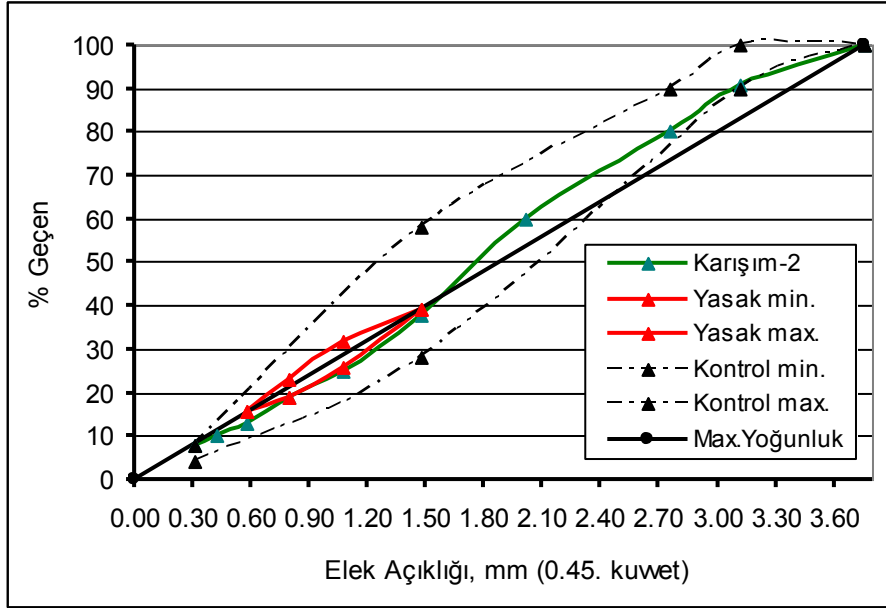
Çalışmada Superpave yöntemine göre maksimum tane boyutu 19 mm, nominal maksimum tane boyutu 12,5 mm olan karışımlar için belirtilen gradasyon kontrol noktaları ve yasaklanmış bölge sınırları dikkate alınarak üç adet deneme agrega karışımı (Karışım-1, Karışım-2 ve Karışım-3) seçilmiştir. Bu gradasyonlara uygun olarak kaba ve ince agrega karışımları hazırlanmıştır. Kaba, ince ve filler agregaların hacim ve zahiri özgül ağırlıkları ASTM C127, ASTM C128 ve ASTM D854 standartlarına uygun olarak belirlenmiştir. Deneme karışımlarının hazırlanmasında B 160/220 sınıfı saf bitüm kullanılmıştır. Karışım gradasyonları Tablo 5.14’te verilmiştir. Ayrıca, bu üç deneme agrega karışımında kullanılan kaba, ince ve filler agregalarının ağırlıkça yüzdeleri ve özgül ağırlıkları da tabloda verilmiştir. Seçilen bu deneme agrega karışımlarının gradasyon eğrileri aşağıda sırasıyla Şekil 5.13, Şekil 5.14 ve Şekil 5.15’te gösterilmiştir.

**Tablo 5.14.** Başlangıç deneme karışımları

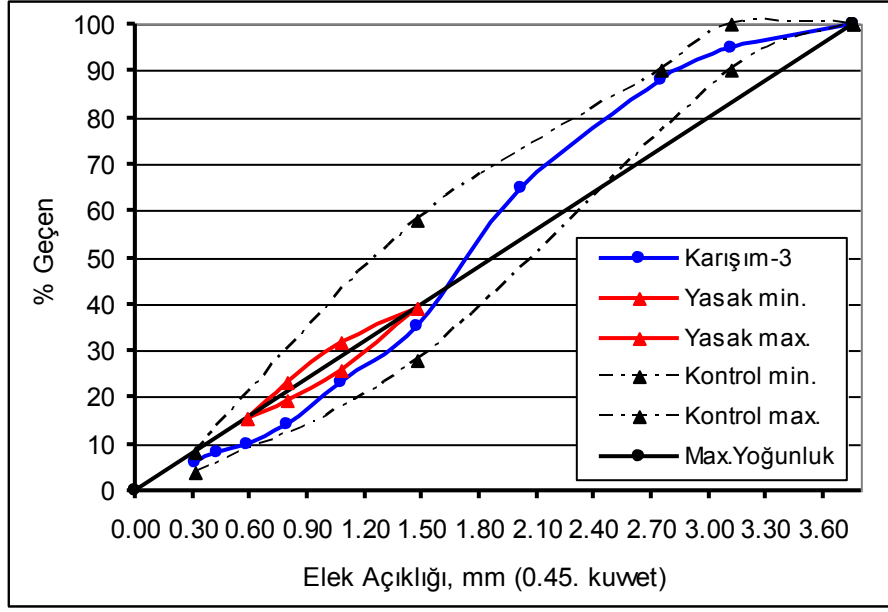
| Elek Boyutu, mm<br>(Elek No)    | Karışım Gradasyonu, % Geçen |           |           |
|---------------------------------|-----------------------------|-----------|-----------|
|                                 | Karışım-1                   | Karışım-2 | Karışım-3 |
| 19 (3/4")                       | 100                         | 100       | 100       |
| 12,5 (1/2")                     | 92                          | 91        | 95        |
| 9,5 (3/8")                      | 78                          | 80        | 88        |
| 4,75 (No.4)                     | 50                          | 60        | 65        |
| 2,36 (No.8)                     | 28                          | 38        | 35        |
| 1,18 (No.16)                    | 18                          | 25        | 23        |
| 0,600 (No.30)                   | 13                          | 19        | 14        |
| 0,300 (No.50)                   | 8                           | 13        | 10        |
| 0,150 (No.100)                  | 6                           | 10        | 8         |
| 0,075 (No.200)                  | 4                           | 8         | 5         |
| Karışımlardaki Agrega Yüzdeleri |                             |           |           |
| Kaba Agrega                     | 50                          | 40        | 35        |
| İnce Agrega                     | 46                          | 52        | 60        |
| Filler                          | 4                           | 8         | 5         |
| Agrega Hacim Özgül Ağırlıkları  |                             |           |           |
| Kaba Agrega                     | 2,525                       | 2,532     | 2,544     |
| İnce Agrega                     | 2,558                       | 2,557     | 2,564     |
| Agrega Zahiri Özgül Ağırlıkları |                             |           |           |
| Kaba Agrega                     | 2,600                       | 2,606     | 2,610     |
| İnce Agrega                     | 2,604                       | 2,611     | 2,618     |
| Filler                          | 2,675                       |           |           |



Şekil 5.13. Karışım-1 agrega gradasyon eğrisi



Şekil 5.14. Karışım-2 agrega gradasyon eğrisi



Şekil 5.15. Karışım-3 agrega gradasyon eğrisi

Tabloda görülen kaba, ince ve filler agregalarının ağırlıkça yüzdeleri ve özgül ağırlıkları kullanılarak her bir deneme agrega karışımının hacim (Gsb) ve zahiri (Gsa) özgül ağırlığı Formül 4.5 ile hesaplanmış ve bu değerler Tablo 5.13'te gösterilmiştir. Hesaplamalarda, fillerin hacim özgül ağırlığı tespit edilemediğinden zahiri özgül ağırlık değeri kullanılmıştır.

$$\text{Karışım-1: } G_{sb} = \frac{100}{\frac{50}{2,525} + \frac{46}{2,558} + \frac{4}{2,675}} = 2,545 \text{ gr/cm}^3$$

$$G_{sa} = \frac{100}{\frac{50}{2,600} + \frac{46}{2,604} + \frac{4}{2,675}} = 2,604 \text{ gr/cm}^3$$

$$\text{Karışım-2: } G_{sb} = \frac{100}{\frac{40}{2,532} + \frac{52}{2,557} + \frac{8}{2,675}} = 2,556 \text{ gr/cm}^3$$

$$G_{sa} = \frac{100}{\frac{40}{2,606} + \frac{52}{2,611} + \frac{8}{2,675}} = 2,614 \text{ gr/cm}^3$$

$$\text{Karışım-3: } G_{sb} = \frac{100}{\frac{35}{2,544} + \frac{60}{2,564} + \frac{5}{2,675}} = 2,562 \text{ gr/cm}^3$$

$$G_{sa} = \frac{100}{\frac{35}{2,610} + \frac{60}{2,618} + \frac{5}{2,675}} = 2,618 \text{ gr/cm}^3$$

Agreganın hacimsel özellikleri tespit edildikten sonraki adımda, her deneme karışımı için hazırlanan asfalt karışım numuneleri belirlenen asfalt içeriklerinde (Pbi) sıkıştırılmış ve hacimsel özellikleri belirlenmiştir. Bu amaçla, her bir deneme karışımı için başlangıçta gereken asfalt bağlayıcı içeriği (Pbi), agrega karışımının efektif özgül ağırlığının (Gse) tespit edilmesi ile birlikte aşağıdaki işlem sırasına göre belirlenmiştir.

Deneme karışımlarının efektif özgül ağırlığı (Gse) Formül 4.6 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\text{Karışım-1: } G_{se} = 2,545 + 0,5 \times (2,604 - 2,545) = 2,575 \text{ gr/cm}^3$$

$$\text{Karışım-2: } G_{se} = 2,556 + 0,5 \times (2,614 - 2,556) = 2,585 \text{ gr/cm}^3$$

$$\text{Karışım-3: } G_{se} = 2,562 + 0,5 \times (2,618 - 2,562) = 2,590 \text{ gr/cm}^3$$

Agrega tarafından absorbe edilecek olan asfalt bağlayıcı hacmi (Vba) Formül 4.7 ile hesaplanmıştır. Hesaplarda hava boşluğunun %4 olduğu kabul edilmektedir.

$$\text{Karışım-1: } V_{ba} = \frac{0,95 \times (1 - 0,04)}{\left(\frac{0,05}{1,020} + \frac{0,95}{2,575}\right)} \times \left(\frac{1}{2,545} - \frac{1}{2,575}\right) = 0,0098 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$$

$$\text{Karışım-2: } V_{ba} = \frac{0,95 \times (1 - 0,04)}{\left(\frac{0,05}{1,020} + \frac{0,95}{2,585}\right)} \times \left(\frac{1}{2,556} - \frac{1}{2,585}\right) = 0,0096 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$$

$$\text{Karışım-3: } V_{ba} = \frac{0,95 \times (1 - 0,04)}{\left(\frac{0,05}{1,020} + \frac{0,95}{2,590}\right)} \times \left(\frac{1}{2,562} - \frac{1}{2,590}\right) = 0,0092 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$$

Her üç deneme karışımının efektif bağlayıcı hacmi (Vbe) ise Formül 4.8 ile belirlenmiştir.

$$\text{Karışım-1,2,3: } V_{be} = 0,176 - 0,0675 \times \text{Log}(12,5) = 0,102 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$$

Son olarak, başlangıç deneme asfalt bağlayıcı içeriği (P<sub>bi</sub>) Formül 4.9 ve Formül 4.10 ile belirlenmiştir.

$$\text{Karışım-1: } W_s = \frac{0,95 \times (1 - 0,04)}{\left(\frac{0,05}{1,020} + \frac{0,95}{2,575}\right)} = 2,182 \text{ gr}$$

$$P_{bi} = \frac{1,020 \times (0,102 + 0,0098)}{(1,020 \times (0,102 + 0,0098)) + 2,182} \times 100 = \% 4,97$$

$$\text{Karışım-2: } W_s = \frac{0,95 \times (1 - 0,04)}{\left(\frac{0,05}{1,020} + \frac{0,95}{2,585}\right)} = 2,190 \text{ gr}$$

$$P_{bi} = \frac{1,020 \times (0,102 + 0,0096)}{(1,020 \times (0,102 + 0,0096)) + 2,190} \times 100 = \% 4,94$$

$$\text{Karışım-3: } W_s = \frac{0,95 \times (1 - 0,04)}{\left(\frac{0,05}{1,020} + \frac{0,95}{2,590}\right)} = 2,193 \text{ gr}$$

$$P_{bi} = \frac{1,020 \times (0,102 + 0,0092)}{(1,020 \times (0,102 + 0,0092)) + 2,193} \times 100 = \% 4,92$$

Karışım ağırlığına göre bulunan bağlayıcı yüzdesi (P<sub>bi</sub>) yardımıyla, toplam agrega ağırlığına göre alınacak bağlayıcı miktarı (W<sub>b</sub>) Formül 4.11 ile hesaplanmıştır. Karışımların hazırlanmasında 100 mm çapında silindirik kalıp kullanılmış ve bu kalıp için gereken toplam agrega ağırlığı 1100 gr olarak alınmıştır.

$$\text{Karışım-1: } W_b = \frac{1100 \times 4,97}{100 - 4,97} = 57,5 \text{ gr}$$

$$\text{Karışım-2: } W_b = \frac{1100 \times 4,94}{100 - 4,94} = 57,2 \text{ gr}$$

$$\text{Karışım-3: } W_b = \frac{1100 \times 4,92}{100 - 4,92} = 56,9 \text{ gr}$$

Çalışmada ilk olarak, deneme agrega karışımlarının sıkıştırılması amacıyla her bir deneme karışımı için iki olmak üzere toplam 6 adet bitümlü sıcak karışım numunesi hazırlanmıştır. Bu amaçla; belirlenen karışım sıcaklığına erişmesi için hazırlanan B 160/220 bağlayıcısı 2 saat, agrega karışımı ise 3 saat karıştırma sıcaklığındaki (155°C)

etüvde ısıtılmıştır. Isıtılmış bitümlü bağlayıcı ısıtılmış agrega üzerine önceden belirlenen miktarda dökülerek bir karıştırıcı vasıtasıyla agrega taneleri bitümlü bağlayıcı ile iyice kaplanana kadar 1,5–2 dakika karıştırılmıştır. Karışım, düz ve yayvan bir tepsiye metrekareye 21–22 kg düşecek kalınlıkta yerleştirilmiş ve önceden ısıtılmış 135°C'deki etüve konularak 4 saat boyunca kısa dönem yaşlandırma işlemine tabi tutulmuştur. Karışım numuneleri, yaşlandırma işleminden sonra, sıkıştırma sıcaklığında (135°C) 30 dakika etüvde bekletilmiştir. Bu sırada, ilk numunenin sıkıştırılmasından yaklaşık 45–60 dakika önce, sıkıştırma kalıbı, alt ve üst plakalar sıkıştırma sıcaklığına ayarlanmış bir etüve konularak yoğurmalı sıkıştırıcı ile yazılımı hazırlanmıştır. Çalışmada, kabul edilen 15 milyon eşdeğer tek dingil yükü tekerrür sayısına göre sıkıştırma parametreleri;  $N_{ini} = 8$ ,  $N_{des} = 100$  ve  $N_{maks} = 160$  olarak alınmıştır.

Çalışmada, 1,25° yoğurma açısına sahip, yoğurma hızı 30 devir/dakika, yoğurma basıncı 0–700 kPa olarak ayarlanabilen ve 100 mm ile 150 mm'lik numune dökmeye elverişli olarak imal edilmiş olan Cooper marka yoğurmalı pres kullanılarak numuneler hazırlanmıştır (Şekil 5.16). Cihazda yoğurma sayısı yazılım kullanılarak otomatik olarak girilmektedir. Yoğurma süresince sıkışma miktarı sensörler yardımıyla ölçülüp otomatik olarak bilgisayara aktarılmaktadır. Yoğurma işlemi sonunda numune cihaz üzerinde monte edilmiş olan kriko yardımıyla kalıptan çıkarılmaktadır.



Şekil 5.16. Cooper yoğurmalı sıkıştırıcı



Deney için sıkıştırma sıcaklığına getirilerek hazırlanan karışımlar kalıba yerleştirilerek sıkıştırma işlemine başlanmıştır. Sıkıştırma işlemi esnasında, istenen yoğurma sayısı (Ndes=100) tamamlanıncaya kadar numuneler sıkıştırılmıştır. Karışımların yoğurma sayılarındaki yükseklikleri cihazda bulunan sensörler sayesinde ölçülmüş ve yazılım sayesinde kaydedilmiştir. Sıkışan numuneler zarar görmeden kalıptan çıkartılarak soğumaya bırakılmış ve bu numunelerin hacim özgül ağırlığı (Gmb(ölçülen)), AASHTO T166 standardına göre tespit edilmiştir. Elde edilen değerler Tablo 5.15’de verilmiştir. Karışım-1’de kaba agrega oranı yüksek olduğundan hacim özgül ağırlık değerleri düşük çıkarken Karışım-2’de ise gradasyon maksimum yoğunluk çizgisine yakın seçildiğinden hacim özgül ağırlık değerleri yüksek çıkmıştır.

**Tablo 5.15.** Deneme karışımlarının ölçülen hacim özgül ağırlıkları

| Hacim Özgül Ağırlık,<br>Gmb(ölçülen) | Karışım-1 |        | Karışım-2 |        | Karışım-3 |        |
|--------------------------------------|-----------|--------|-----------|--------|-----------|--------|
|                                      | 1         | 2      | 1         | 2      | 1         | 2      |
| Kuru ağırlık, A (gr)                 | 1149,4    | 1152,7 | 1153,5    | 1152,5 | 1152,5    | 1153,2 |
| Sudaki ağırlık, C (gr)               | 647,7     | 647    | 668,5     | 668,4  | 657,8     | 658,7  |
| Doğun yüzey kuru ağırlık,<br>B (gr)  | 1159,6    | 1159,7 | 1158,7    | 1156,7 | 1157,8    | 1158,5 |
| Gmb(ölçülen) = A/(B-C)               | 2,245     | 2,248  | 2,353     | 2,360  | 2,305     | 2,307  |

Daha sonra, deneme agrega karışımlarının maksimum teorik özgül ağırlıklarının (Gmm) tespit edilmesi amacıyla her bir deneme karışımı için iki olmak üzere toplam 6 adet asfalt karışımı daha hazırlanmıştır. Yukarıda ifade edildiği gibi hazırlanan ve yaşlandırma işleminden sonra soğumaya bırakılan karışım numunelerinin maksimum teorik özgül ağırlıkları AASHTO T209 standardına göre tespit edilerek sonuçları Tablo 5.16’da verilmiştir.

**Tablo 5.16.** Deneme karışımlarının maksimum teorik özgül ağırlıkları

| Maksimum Teorik Özgül<br>Ağırlık, (Gmm) | Karışım-1 |        | Karışım-2 |        | Karışım-3 |        |
|---|-----------|--------|-----------|--------|-----------|--------|
|   | 1         | 2      | 1         | 2      | 1         | 2      |
| Piknometre, A (gr)                      | 493,8     | 493,8  | 493,8     | 493,8  | 493,8     | 493,8  |
| Piknometre +Su, B (gr)                  | 1523,5    | 1523,5 | 1523,5    | 1523,5 | 1523,5    | 1523,5 |
| Piknometre +Numune, C (gr)              | 1644,5    | 1645,3 | 1646,5    | 1647,2 | 1646,3    | 1647,6 |
| Piknometre +Numune+Su, D<br>(gr)        | 2184,7    | 2186,2 | 2199,7    | 2198,9 | 2194,9    | 2196,5 |
| Gmm=(C-A)/((B-A)-(D-C))                 | 2,351     | 2,356  | 2,419     | 2,413  | 2,396     | 2,400  |
| Ortalama, Gmm                           | 2,353     |        | 2,416     |        | 2,398     |        |

Belirlenen Gmm değerlerinden faydalanılarak hesapla Gse değerleri belirlenmiştir. Belirlenen bu Gse değerleri çalışmanın geri kalan kısmında kullanılmıştır.

Karışım-1 için;

$$Gse \text{ (hesap)} = \frac{100 - 4,97}{\left(\frac{100}{2,353} - \frac{4,97}{1,020}\right)} = 2,525 \text{ gr/cm}^3$$

Karışım-2 için;

$$Gse \text{ (hesap)} = \frac{100 - 4,94}{\left(\frac{100}{2,416} - \frac{4,94}{1,020}\right)} = 2,601 \text{ gr/cm}^3$$

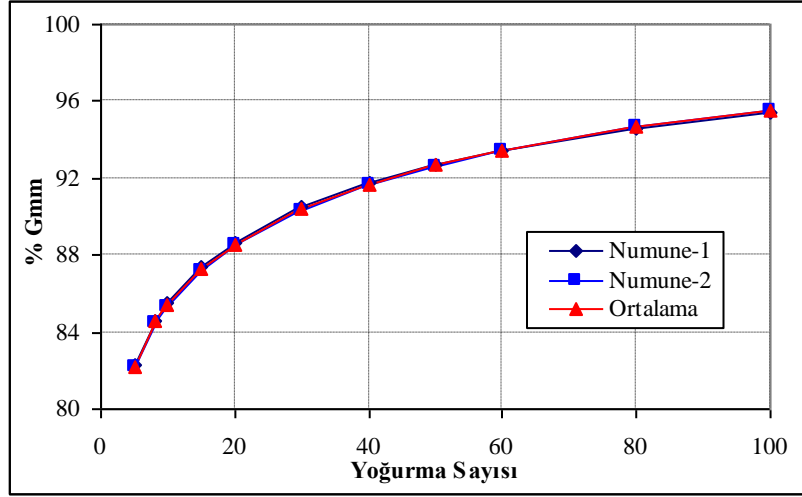
Karışım-3 için;

$$Gse \text{ (hesap)} = \frac{100 - 4,92}{\left(\frac{100}{2,398} - \frac{4,92}{1,020}\right)} = 2,578 \text{ gr/cm}^3$$

Her bir karışım numunesinin elde edilen sıkıştırma verileri (hx, Gmb(ölçülen), Wm, Gmm) kullanılarak, tasarım yoğurma sayısındaki (Ndes) tahmini hacim özgül ağırlık (Gmb(tahmini)), düzeltme faktörü (C), düzeltilmiş hacim özgül ağırlık (Gmb(düzeltilmiş)) ve son olarak maksimum teorik özgül ağırlık yüzdesi (%Gmm) hesaplanmış ve sonuçları analiz edilmiştir. Tablo 5.17’de deneme karışımlarından Karışım-1’in, PG 58–34 ana bağlayıcısı ile %4,97 bitüm içeriğinde hazırlanan numunelerine ait sıkıştırma karakteristikleri verilmiştir. Sıkıştırılan Karışım-1 numunelerinin farklı yoğurma sayılarındaki yoğunluk değerleri ve bu değerlerin ortalaması Şekil 5.17’de gösterilmiştir.

**Tablo 5.17.** Karışım-1 numunelerinin %4,97 bitüm içeriğindeki sıkıştırma karakteristikleri

| Devir<br>(Yoğ.)<br>Sayısı | Karışım-1 Numunelerinin Sıkıştırılması |               |                |       |           |               |                |       | Ortalama<br>%Gmm |
|---------------------------|--|---------------|----------------|-------|-----------|---------------|----------------|-------|------------------|
|                           | Numune-1                               |               | Wm = 1149,4 gr |       | Numune-2  |               | Wm = 1152,7 gr |       |                  |
|                           | H<br>(mm)                              | Gmb<br>(tah.) | Gmb<br>(düz.)  | %Gmm  | H<br>(mm) | Gmb<br>(tah.) | Gmb<br>(düz.)  | %Gmm  |                  |
| Nini= 8                   | 76,0                                   | 1,926         | 1,991          | 84,62 | 76,1      | 1,931         | 1,987          | 84,44 | 84,53            |
| 20                        | 72,6                                   | 2,017         | 2,085          | 88,62 | 72,6      | 2,024         | 2,082          | 88,51 | 88,57            |
| 40                        | 70,1                                   | 2,089         | 2,159          | 91,77 | 70,1      | 2,095         | 2,156          | 91,64 | 91,71            |
| 60                        | 68,8                                   | 2,128         | 2,199          | 93,47 | 68,7      | 2,136         | 2,198          | 93,43 | 93,45            |
| 80                        | 68,0                                   | 2,153         | 2,226          | 94,61 | 67,8      | 2,165         | 2,227          | 94,68 | 94,64            |
| Ndes= 100                 | 67,4                                   | 2,172         | 2,245          | 95,44 | 67,2      | 2,185         | 2,248          | 95,56 | 95,50            |
| Gmb(ölçülen)              |  | 2,245         |                |       | 2,248     |               |                |       |                  |
| Düz. Faktörü. (C)         |  | 1,034         |                |       | 1,029     |               |                |       |                  |
| Gmm(ölçülen)              |  | 2,353         |                |       |           |               |                |       |                  |



Şekil 5.17. Karışım-1 numunelerinin yoğunluk eğrileri ve ortalaması

Tablo 5.17’de tasarım yoğurma sayısında (Ndes) 1. numune için gösterilen hesaplamalar aşağıdaki gibi yapılmıştır.

$$W_m = 1149,4 \text{ gr}$$

$$V_{mx} = \frac{\pi d^2 h x}{4} \times 0,001$$

$$V_{mx} = \frac{3,14 \times 100^2 \times 67,4}{4} \times 0,001 = 529,09 \text{ cm}^3$$

$$G_{mb}(\text{tahmini}) = \frac{(W_m / V_{mx})}{\gamma_{su}}$$

$$\gamma_{su} = 1 \text{ gr/cm}^3$$

$$G_{mb}(\text{tahmini}) = (1149,4 / 529,09) / 1 = 2,172 \text{ gr/cm}^3$$

$$G_{mb}(\text{ölçülen}) = 2,245 \text{ gr/cm}^3$$

$$G_{mm}(\text{ölçülen}) = 2,353 \text{ gr/cm}^3$$

$$C = \frac{G_{mb}(\text{ölçülen})}{G_{mb}(\text{tahmini})} = 2,245 / 2,172 = 1,034$$

$$G_{mb}(\text{düzeltilmiş}) = C \times G_{mb}(\text{tahmini})$$

$$G_{mb}(\text{düzeltilmiş}) = 1,034 \times 2,172 = 2,245$$

$$\% \text{ Gmm} = 100 \times \text{Gmb}(\text{düzeltilmiş}) / \text{Gmm}(\text{ölçülen})$$

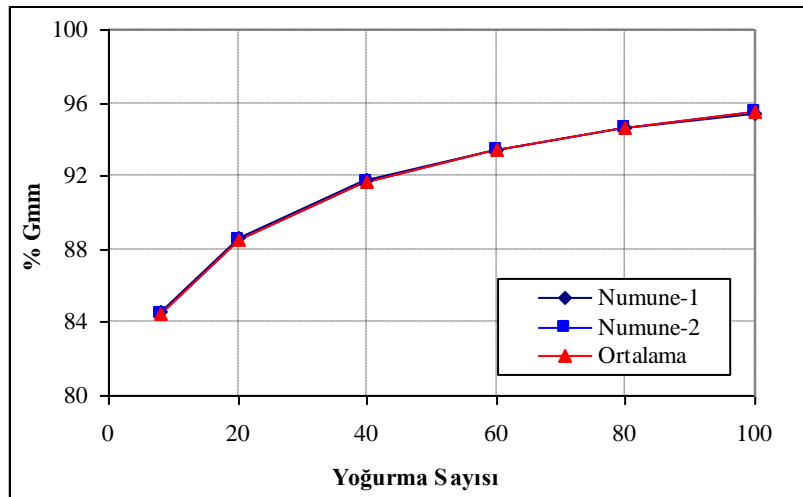
$$\% \text{ Gmm} = 100 \times 2,245 / 2,353 = \%95,44$$

$$\text{Ortalama } \% \text{ Gmm} = (95,44 + 95,56) / 2 = \%95,50$$

Karışım-2'nin %4,94 ve Karışım-3'ün %4,92 bitüm içeriğinde hazırlanan asfalt karışım numunelerine ait sıkıştırma karakteristikleri Tablo 5.18 ve Tablo 5.19'de, yoğunluk eğrileri ise Şekil 5.18 ve Şekil 5.19'da verilmiştir.

**Tablo 5.18.** Karışım-2 numunelerinin %4,94 bitüm içeriğindeki sıkıştırma karakteristikleri

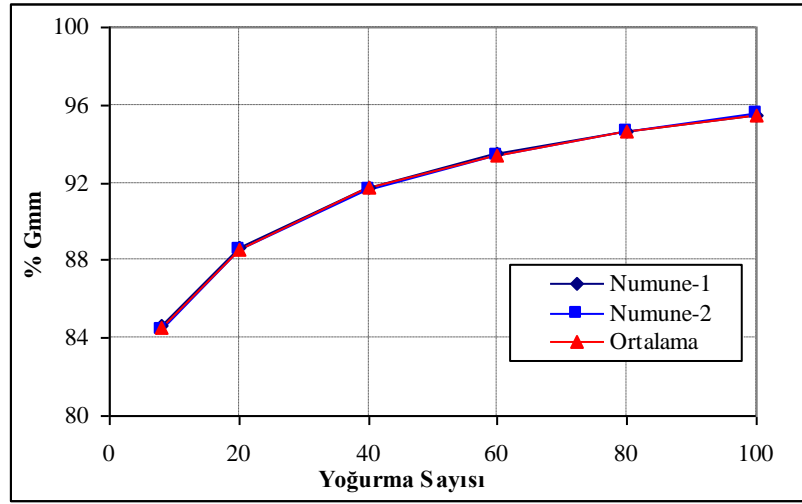
| Devir Sayısı      | Karışım-2 Numunelerinin Sıkıştırılması |            |                |       |          |            |                |       | Ortalama %Gmm |
|-------------------|--|------------|----------------|-------|----------|------------|----------------|-------|---------------|
|                   | Numune-1                               |            | Wm = 1153,5 gr |       | Numune-2 |            | Wm = 1152,5 gr |       |               |
|                   | H (mm)                                 | Gmb (tah.) | Gmb (düz.)     | %Gmm  | H (mm)   | Gmb (tah.) | Gmb (düz.)     | %Gmm  |               |
| Nini= 8           | 72,5                                   | 2,028      | 2,091          | 86,55 | 71,8     | 2,044      | 2,097          | 86,78 | 86,66         |
| 20                | 68,9                                   | 2,131      | 2,198          | 90,97 | 68,4     | 2,145      | 2,200          | 91,07 | 91,02         |
| 40                | 66,6                                   | 2,205      | 2,274          | 94,13 | 66,1     | 2,221      | 2,278          | 94,27 | 94,20         |
| 60                | 65,5                                   | 2,244      | 2,314          | 95,77 | 65,0     | 2,260      | 2,318          | 95,94 | 95,86         |
| 80                | 64,8                                   | 2,267      | 2,338          | 96,77 | 64,3     | 2,283      | 2,342          | 96,93 | 96,85         |
| Ndes= 100         | 64,4                                   | 2,282      | 2,353          | 97,39 | 63,8     | 2,301      | 2,360          | 97,69 | 97,54         |
| Gmb(ölçülen)      |  | 2,353      |                |       | 2,360    |            |                |       |               |
| Düz. Faktörü. (C) |  | 1,031      |                |       | 1,026    |            |                |       |               |
| Gmm(ölçülen)      |  | 2,416      |                |       |          |            |                |       |               |



**Şekil 5.18.** Karışım-2 numunelerinin yoğunluk eğrileri ve ortalaması

**Tablo 5.19.** Karışım-3 numunelerinin %4,92 bitüm içeriğindeki sıkıştırma karakteristikleri

| Devir Sayısı      | Karışım-3 Numunelerinin Sıkıştırılması |            |                |       |          |            |                |       | Ortalama %Gmm |
|-------------------|--|------------|----------------|-------|----------|------------|----------------|-------|---------------|
|                   | Numune-1                               |            | Wm = 1152,5 gr |       | Numune-2 |            | Wm = 1153,2 gr |       |               |
|                   | H (mm)                                 | Gmb (tah.) | Gmb (düz.)     | %Gmm  | H (mm)   | Gmb (tah.) | Gmb (düz.)     | %Gmm  |               |
| Nini= 8           | 75,0                                   | 1,958      | 2,038          | 84,99 | 75,0     | 1,959      | 2,058          | 85,84 | 85,41         |
| 20                | 71,5                                   | 2,053      | 2,137          | 89,12 | 71,8     | 2,046      | 2,150          | 89,68 | 89,40         |
| 40                | 69,0                                   | 2,128      | 2,215          | 92,37 | 69,5     | 2,114      | 2,221          | 92,63 | 92,50         |
| 60                | 67,7                                   | 2,169      | 2,257          | 94,15 | 68,3     | 2,151      | 2,260          | 94,25 | 94,20         |
| 80                | 66,9                                   | 2,195      | 2,285          | 95,30 | 67,5     | 2,177      | 2,287          | 95,39 | 95,35         |
| Ndes= 100         | 66,3                                   | 2,214      | 2,305          | 96,14 | 66,9     | 2,196      | 2,307          | 96,23 | 96,19         |
| Gmb(ölçülen)      |  | 2,305      |                |       | 2,307    |            |                |       |               |
| Düz. Faktörü. (C) |  | 1,041      |                |       | 1,051    |            |                |       |               |
| Gmm(ölçülen)      |  | 2,398      |                |       |          |            |                |       |               |



**Şekil 5.19.** Karışım-3 numunelerinin yoğunluk eğrileri ve ortalaması

Deneme karışımlarının özelliklerinin tayin edilebilmesi ve şartname limitleri ile karşılaştırılabilmesi için, hesaplamalarda gerekli olan ortalama %Gmm@Ndes ve %Gmm@Nini değerleri Tablo 5.16, Tablo 5.17 ve Tablo 5.18'den alınarak aşağıda Tablo 5.20'de verilmiştir. Bu yoğunluklar esas alınarak, her karışımın tasarım yoğurma sayısındaki (Ndes) hava boşluğu yüzdesi (Va) ve mineral agregadaki boşluk yüzdesi (VMA) aşağıdaki bağıntılar ile belirlenmiş ve Tablo 5.21'de verilmiştir.

**Tablo 5.20.** Deneme karışımlarının Nini ve Ndes'deki %Gmm değerleri

| Deneme Karışımı | %Gmm@Nini | %Gmm@Ndes |
|-----------------|-----------|-----------|
| Karışım-1       | 84,53     | 95,50     |
| Karışım-2       | 86,66     | 97,54     |
| Karışım-3       | 85,41     | 96,19     |

$$V_a = 100 - \%G_{mm@N_{des}}$$

$$\text{Karışım-1: } V_a = 100 - 95,50 = \%4,50$$

$$\text{Karışım-2: } V_a = 100 - 97,54 = \%2,46$$

$$\text{Karışım-3: } V_a = 100 - 96,19 = \%3,81$$

$$\%VMA = 100 - \left( \frac{\%G_{mm@N_{des}} \times G_{mm} \times P_s}{G_{sb}} \right)$$

$$\text{Karışım-1: } VMA = 100 - \left( \frac{95,50 \times 2,353 \times 0,9503}{2,545} \right) = \%16,11$$

$$\text{Karışım-2: } VMA = 100 - \left( \frac{97,54 \times 2,416 \times 0,9506}{2,556} \right) = \%12,36$$

$$\text{Karışım-3: } VMA = 100 - \left( \frac{96,19 \times 2,398 \times 0,9508}{2,563} \right) = \%14,42$$

**Tablo 5.21.** Deneme karışımlarının sıkıştırma hesap özeti

| Deneme Karışımı | %AC  | %G <sub>mm@N<sub>i</sub></sub> | %G <sub>mm@N<sub>des</sub></sub> | %V <sub>a</sub> | %VMA  |
|-----------------|------|--------------------------------|----------------------------------|-----------------|-------|
| Karışım-1       | 4,97 | 84,53                          | 95,50                            | 4,50            | 16,11 |
| Karışım-2       | 4,94 | 86,66                          | 97,54                            | 2,46            | 12,36 |
| Karışım-3       | 4,92 | 85,41                          | 96,19                            | 3,81            | 14,42 |

Deneme karışımları için tasarım yoğurma sayısında (N<sub>des</sub>) bulunan hava boşluğu yüzdeleri % 4'den farklı çıktığından, tasarım yoğurma sayısındaki hava boşluğu %4 olan tahmini bir asfalt içeriği hesaplanmış ve hesaplanan tahmini tasarım asfalt içeriğindeki tahmini tasarım özellikleri aşağıdaki gibi belirlenmiştir. Tasarım yoğurma sayısında (N<sub>des</sub>) hava boşluğu % 4 olan tahmini asfalt içeriği;

$$P_b(\text{tahmini}) = P_{bi} - (0,4 \times (4 - V_a))$$

$$\text{Karışım-1: } P_b(\text{tahmini}) = 4,97 - (0,4 \times (4 - 4,50)) = \%5,16$$

$$\text{Karışım-2: } P_b(\text{tahmini}) = 4,94 - (0,4 \times (4 - 2,46)) = \%4,32$$

$$\text{Karışım-3: } P_b(\text{tahmini}) = 4,92 - (0,4 \times (4 - 3,81)) = \%4,84$$

Tasarım yoğurma sayısındaki (N<sub>des</sub>), hacimsel özellikler olan VMA ve VFA ve başlangıç yoğurma sayısındaki (N<sub>i</sub>) karışım yoğunlukları, bu tahmini asfalt içerikleri için aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$\%VMA(\text{tahmini}) = \%VMA(\text{başlangıç}) + C \times (4 - Va)$$

Karışım-1'de boşluk oranı %4'ten büyük olduğundan C katsayısı 0,2 Karışım-2 ve Karışım-3 deneme karışımlarında ise boşluk oranı ise %4'ten küçük olduğundan 0,1 olarak alınmıştır.

$$\text{Karışım-1: } \%VMA(\text{tahmini}) = 16,11 + 0,2 \times (4 - 4,50) = \%16,02$$

$$\text{Karışım-2: } \%VMA(\text{tahmini}) = 12,36 + 0,1 \times (4 - 2,46) = \%12,51$$

$$\text{Karışım-3: } \%VMA(\text{tahmini}) = 14,42 + 0,1 \times (4 - 3,81) = \%14,44$$

$$\%VFA(\text{tahmini}) = 100 \times \frac{(\%VMA(\text{tahmini}) - 4,0)}{\%VMA(\text{tahmini})}$$

$$\text{Karışım-1: } \%VFA(\text{tahmini}) = \frac{16,02 - 4,0}{16,02} \times 100 = \%75,02$$

$$\text{Karışım-2: } \%VFA(\text{tahmini}) = \frac{12,51 - 4,0}{12,51} \times 100 = \%68,03$$

$$\text{Karışım-3 : } \%VFA(\text{tahmini}) = \frac{14,44 - 4,0}{14,44} \times 100 = \%72,30$$

$$\%Gmm(\text{tahmini})@Nini = \%Gmm(\text{deneme})@Nini - (4,0 - Va)$$

$$\text{Karışım-1: } \%Gmm(\text{tahmini})@Nini = 84,53 - (4,0 - 4,50) = \%85,03$$

$$\text{Karışım-2: } \%Gmm(\text{tahmini})@Nini = 86,66 - (4,0 - 2,46) = \%85,12$$

$$\text{Karışım-3: } \%Gmm(\text{tahmini})@Nini = 85,41 - (4,0 - 3,81) = \%85,23$$

Son olarak, karışımda kullanılan 0,075 mm'lik elekten geçen malzemenin ağırlıkça yüzdesinin, efektif asfalt bağlayıcı içeriğine oranlanması ile hesaplanan filler veya toz oranı (DP) aşağıdaki gibi bulunmuştur.

$$Pbe(\text{tahmini}) = Pb(\text{tahmini}) - (Ps \times Gb) \times \left( \frac{Gse - Gsb}{Gse \times Gsb} \right)$$

$$\text{Karışım-1: } Pbe(\text{tahmini}) = 4,97 - (95,03 \times 1,020) \times \left( \frac{2,575 - 2,545}{2,575 \times 2,545} \right) = \%4,73$$

$$\text{Karışım-2: } Pbe(\text{tahmini}) = 4,94 - (95,06 \times 1,020) \times \left( \frac{2,585 - 2,556}{2,585 \times 2,556} \right) = \%3,90$$

$$\text{Karışım-3: } P_{be}(\text{tahmini}) = 4,92 - (95,08 \times 1,020) \times \left( \frac{2,591 - 2,563}{2,591 \times 2,563} \right) = \%4,43$$

$$DP = \frac{P_{0.075}}{P_{be}(\text{tahmini})}$$

$$\text{Karışım-1: } DP = 4,0/4,73 = 0,85$$

$$\text{Karışım-2: } DP = 8,0/3,90 = 2,05$$

$$\text{Karışım-3: } DP = 5,0/4,43 = 1,13$$

Sonuç olarak, başlangıçta değerlendirilmeye alınan üç farklı agrega karışımı için, başlangıç bitüm içeriklerinde hazırlanan numunelerin yukarıda ifade edilen tahmini değerleri hesaplandıktan sonra, bu değerler Tablo 5.22’de gösterilerek şartname kriterleri ile ayrı ayrı karşılaştırılmıştır.

**Tablo 5.22.** Deneme karışımlarının sıkıştırma sonuçları ve şartname kriterleri

| Deneme Karışımı     | P <sub>bi</sub> (%) | P <sub>b</sub> (%) | V <sub>a</sub> (%) | VMA (%)     | VFA (%)      | DP      | %Gmm@Nini | %Gmm@Ndes |
|---------------------|---------------------|--------------------|--------------------|-------------|--------------|---------|-----------|-----------|
| Karışım-1           | 4,97                | 5,16               | 4,00               | 16,02       | 75,02        | 0,85    | 85.03     | 96.00     |
| Karışım-2           | 4,94                | 4,32               | 4,00               | 12,51       | 68,03        | 2,05    | 85.12     | 96.00     |
| Karışım-3           | 4,92                | 4,84               | 4,00               | 14,44       | 72,30        | 1,13    | 85.23     | 96.00     |
| Şartname Kriterleri |                     |                    | 4,00               | 14,0 (min.) | 65-75 (min.) | 0,8-1,6 | ≤89,0     | 96,00     |

Sıkıştırılan deneme karışımlarının özellikleri şartname kriterleri ile kıyaslandığında, Karışım-1’in bitümle dolu boşluk oranı (VFA) şartname kriterini sağlamadığı, Karışım-2’nin agregalar arası boşluk oranı (VMA) ve filler oranı (DP) bakımından şartname kriterlerini sağlamadığı belirlenmiştir. Karışım-3’ün ise bütün şartname kriterlerini sağladığı tespit edilmiştir. Bu nedenle çalışmanın geri kalanında Karışım-3’e ait deneme agrega gradasyonun, tasarım agrega gradasyonu olarak kullanılmasına karar verilmiştir.

#### 5.4.1. B 160/220 Bitümü İle Hazırlanan Karışımlar İçin Tasarım Bağlayıcı İçeriğinin Tespit Edilmesi

Hazırlanan deneme agrega karışımlarından tasarım agrega gradasyonu seçildikten sonra, kabul edilen deneme karışımının (Karışım-3) tahmini asfalt içeriğinde, ±%0,5 ve



+%1,0 olmak üzere dört ayrı asfalt içeriğinde ve her asfalt içeriği için en az iki numune olmak üzere toplam 8 asfalt karışım numunesi hazırlanmıştır. Bu dört asfalt içeriği, Superpave karışım tasarım yöntemi için minimum gereksinimdir. Karışım-3 için; B 160/220 bağlayıcısı kullanılarak %4,34; %4,84; %5,34 ve %5,84 bitüm içeriklerinde hazırlanan karışım numuneleri tasarım agrega gradasyonu seçiminde olduğu gibi hazırlanmış ve sıkıştırılmıştır. Ayrıca, seçilen agrega karışımının her bir asfalt içeriğindeki karışımlarının maksimum teorik özgül ağırlık (Gmm) ve sıkışmış hacim özgül ağırlık (Gmb) değerleri belirlenerek Tablo 5.23’de gösterilmiştir.

**Tablo 5.23.** Farklı asfalt içeriklerinde sıkıştırılan karışım numunelerinin fiziksel özellikleri

| %AC (Pb) | Wb (gr) | Numune-1 |            |            |            | Numune-2 |            |            |            | Gmm   |
|----------|---------|----------|------------|------------|------------|----------|------------|------------|------------|-------|
|          |         | A (kuru) | B (doygun) | C (sudaki) | Gmb (ölç.) | A (kuru) | B (doygun) | C (sudaki) | Gmb (ölç.) |       |
| 4,34     | 49,92   | 1146,5   | 1155,0     | 649,5      | 2,268      | 1147,2   | 1156,7     | 650,2      | 2,265      | 2,416 |
| 4,84     | 55,96   | 1151,9   | 1158,8     | 657,6      | 2,298      | 1151,5   | 1159,4     | 658,8      | 2,300      | 2,399 |
| 5,34     | 62,06   | 1158,2   | 1163,7     | 662,3      | 2,310      | 1156,5   | 1163,4     | 663,8      | 2,315      | 2,382 |
| 5,84     | 68,23   | 1162,3   | 1165,3     | 665,6      | 2,326      | 1162,1   | 1165,6     | 664,5      | 2,319      | 2,365 |

Karışım-3 agrega gradasyonunda ve %4,34; %4,84; %5,34 ve %5,84 bitüm içeriklerinde hazırlanan bitümlü sıcak karışım numunelerine ait sıkıştırma karakteristikleri Tablo 5.24-5.27’de verilmiştir.

**Tablo 5.24.** Karışım numunelerinin %4,34 bitüm içeriğindeki sıkıştırma karakteristikleri

| Devir Sayısı      | Karışım Numunelerinin Sıkıştırılması |            |                |       |          |            |                |       | Ortalama %Gmm |
|-------------------|--------------------------------------|------------|----------------|-------|----------|------------|----------------|-------|---------------|
|                   | Numune-1                             |            | Wm = 1146,5 gr |       | Numune-2 |            | Wm = 1147,2 gr |       |               |
|                   | H (mm)                               | Gmb (tah.) | Gmb (düz.)     | %Gmm  | H (mm)   | Gmb (tah.) | Gmb (düz.)     | %Gmm  |               |
| Nini= 8           | 75,7                                 | 1,929      | 2,025          | 83,82 | 75,6     | 1,933      | 2,028          | 83,96 | 83,89         |
| 20                | 72,4                                 | 2,017      | 2,117          | 87,66 | 72,5     | 2,016      | 2,115          | 87,55 | 87,61         |
| 40                | 70,2                                 | 2,081      | 2,184          | 90,42 | 70,3     | 2,079      | 2,181          | 90,29 | 90,36         |
| 60                | 68,9                                 | 2,121      | 2,226          | 92,17 | 69,1     | 2,115      | 2,219          | 91,86 | 92,01         |
| 80                | 68,2                                 | 2,140      | 2,247          | 93,02 | 68,3     | 2,140      | 2,245          | 92,94 | 92,98         |
| Ndes= 100         | 67,6                                 | 2,161      | 2,268          | 93,89 | 67,7     | 2,159      | 2,265          | 93,76 | 93,83         |
| Gmb(ölçülen)      |                                      |            | 2,268          |       |          |            | 2,265          |       |               |
| Düz. Faktörü. (C) |                                      |            | 1,050          |       |          |            | 1,049          |       |               |
| Gmm(hesaplanan)   | 2,416                                |            |                |       |          |            |                |       |               |

**Tablo 5.25.** Karışım numunelerinin %4,84 bitüm içeriğindeki sıkıştırma karakteristikleri

| Devir Sayısı    | Karışım Numunelerinin Sıkıştırılması |            |                |       |          |            |                |       | Ortalama %Gmm |
|-----------------|--------------------------------------|------------|----------------|-------|----------|------------|----------------|-------|---------------|
|                 | Numune-1                             |            | Wm = 1151,9 gr |       | Numune-2 |            | Wm = 1151,5 gr |       |               |
|                 | H (mm)                               | Gmb (tah.) | Gmb (düz.)     | %Gmm  | H (mm)   | Gmb (tah.) | Gmb (düz.)     | %Gmm  |               |
| Nini= 8         | 76,1                                 | 1,928      | 2,036          | 84,86 | 76,3     | 1,923      | 2,029          | 84,59 | 84,72         |
| 20              | 72,5                                 | 2,025      | 2,138          | 89,13 | 72,6     | 2,020      | 2,132          | 88,90 | 89,01         |
| 40              | 70,0                                 | 2,095      | 2,212          | 92,20 | 70,2     | 2,090      | 2,205          | 91,94 | 92,07         |
| 60              | 68,8                                 | 2,133      | 2,251          | 93,86 | 68,7     | 2,135      | 2,253          | 93,94 | 93,90         |
| 80              | 68,0                                 | 2,159      | 2,279          | 95,03 | 68,1     | 2,154      | 2,273          | 94,77 | 94,90         |
| Ndes= 100       | 67,4                                 | 2,177      | 2,298          | 95,82 | 67,3     | 2,180      | 2,300          | 95,90 | 95,86         |
| Gmb(ölçülen)    |                                      | 2,298      |                |       | 2,300    |            |                |       |               |
| Düz. Fakt. (C)  |                                      | 1,056      |                |       | 1,055    |            |                |       |               |
| Gmm(hesaplanan) |                                      | 2,399      |                |       |          |            |                |       |               |

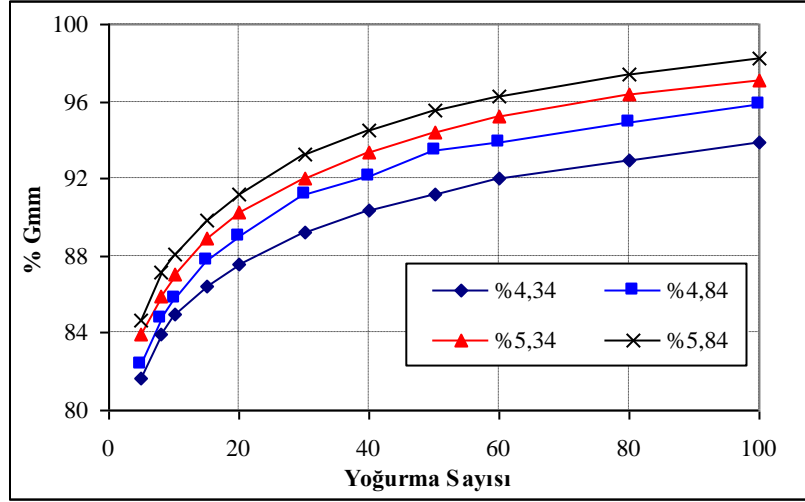
**Tablo 5.26.** Karışım numunelerinin %5,34 bitüm içeriğindeki sıkıştırma karakteristikleri

| Devir Sayısı    | Karışım Numunelerinin Sıkıştırılması |            |                |       |          |            |                |       | Ortalama %Gmm |
|-----------------|--------------------------------------|------------|----------------|-------|----------|------------|----------------|-------|---------------|
|                 | Numune-1                             |            | Wm = 1158,2 gr |       | Numune-2 |            | Wm = 1156,5 gr |       |               |
|                 | H (mm)                               | Gmb (tah.) | Gmb (düz.)     | %Gmm  | H (mm)   | Gmb (tah.) | Gmb (düz.)     | %Gmm  |               |
| Nini= 8         | 75,0                                 | 1,967      | 2,045          | 85,86 | 75,3     | 1,957      | 2,047          | 85,96 | 85,91         |
| 20              | 71,4                                 | 2,065      | 2,147          | 90,13 | 71,7     | 2,055      | 2,150          | 90,27 | 90,20         |
| 40              | 69,0                                 | 2,137      | 2,222          | 93,27 | 69,3     | 2,126      | 2,225          | 93,40 | 93,34         |
| 60              | 67,7                                 | 2,179      | 2,265          | 95,10 | 67,9     | 2,170      | 2,271          | 95,32 | 95,21         |
| 80              | 66,8                                 | 2,207      | 2,295          | 96,33 | 67,1     | 2,196      | 2,298          | 96,46 | 96,40         |
| Ndes= 100       | 66,4                                 | 2,222      | 2,310          | 96,98 | 66,6     | 2,212      | 2,315          | 97,18 | 97,08         |
| Gmb(ölçülen)    |                                      | 2,310      |                |       | 2,315    |            |                |       |               |
| Düz. Fakt. (C)  |                                      | 1,040      |                |       | 1,046    |            |                |       |               |
| Gmm(hesaplanan) |                                      | 2,382      |                |       |          |            |                |       |               |

**Tablo 5.27.** Karışım numunelerinin %5,84 bitüm içeriğindeki sıkıştırma karakteristikleri

| Devir Sayısı      | Karışım Numunelerinin Sıkıştırılması |            |                |       |          |            |                |       | Ortalama %Gmm |
|-------------------|--------------------------------------|------------|----------------|-------|----------|------------|----------------|-------|---------------|
|                   | Numune-1                             |            | Wm = 1162,3 gr |       | Numune-2 |            | Wm = 1162,1 gr |       |               |
|                   | H (mm)                               | Gmb (tah.) | Gmb (düz.)     | %Gmm  | H (mm)   | Gmb (tah.) | Gmb (düz.)     | %Gmm  |               |
| Nini= 8           | 74,1                                 | 1,998      | 2,062          | 87,19 | 74,4     | 1,990      | 2,060          | 87,11 | 87,15         |
| 20                | 70,7                                 | 2,093      | 2,160          | 91,33 | 71,2     | 2,079      | 2,153          | 91,02 | 91,18         |
| 40                | 68,3                                 | 2,168      | 2,238          | 94,60 | 68,7     | 2,155      | 2,231          | 94,33 | 94,47         |
| 60                | 67,1                                 | 2,207      | 2,278          | 96,29 | 67,4     | 2,196      | 2,274          | 96,15 | 96,22         |
| 80                | 66,3                                 | 2,235      | 2,306          | 97,51 | 66,7     | 2,219      | 2,298          | 97,16 | 97,33         |
| Ndes= 100         | 65,7                                 | 2,254      | 2,326          | 98,33 | 66,1     | 2,240      | 2,319          | 98,04 | 98,19         |
| Gmb(ölçülen)      |                                      | 2,326      |                |       | 2,319    |            |                |       |               |
| Düz. Faktörü. (C) |                                      | 1,032      |                |       | 1,035    |            |                |       |               |
| Gmm(hesaplanan)   |                                      | 2,365      |                |       |          |            |                |       |               |

Karışım-3 agrega gradasyonu ile %4,34; %4,84; %5,34 ve %5,84 asfalt içeriklerinde hazırlanan bitümlü sıcak karışım numunelerinin ortalama yoğunluk eğrileri, Şekil 5.20’de gösterilmiştir.



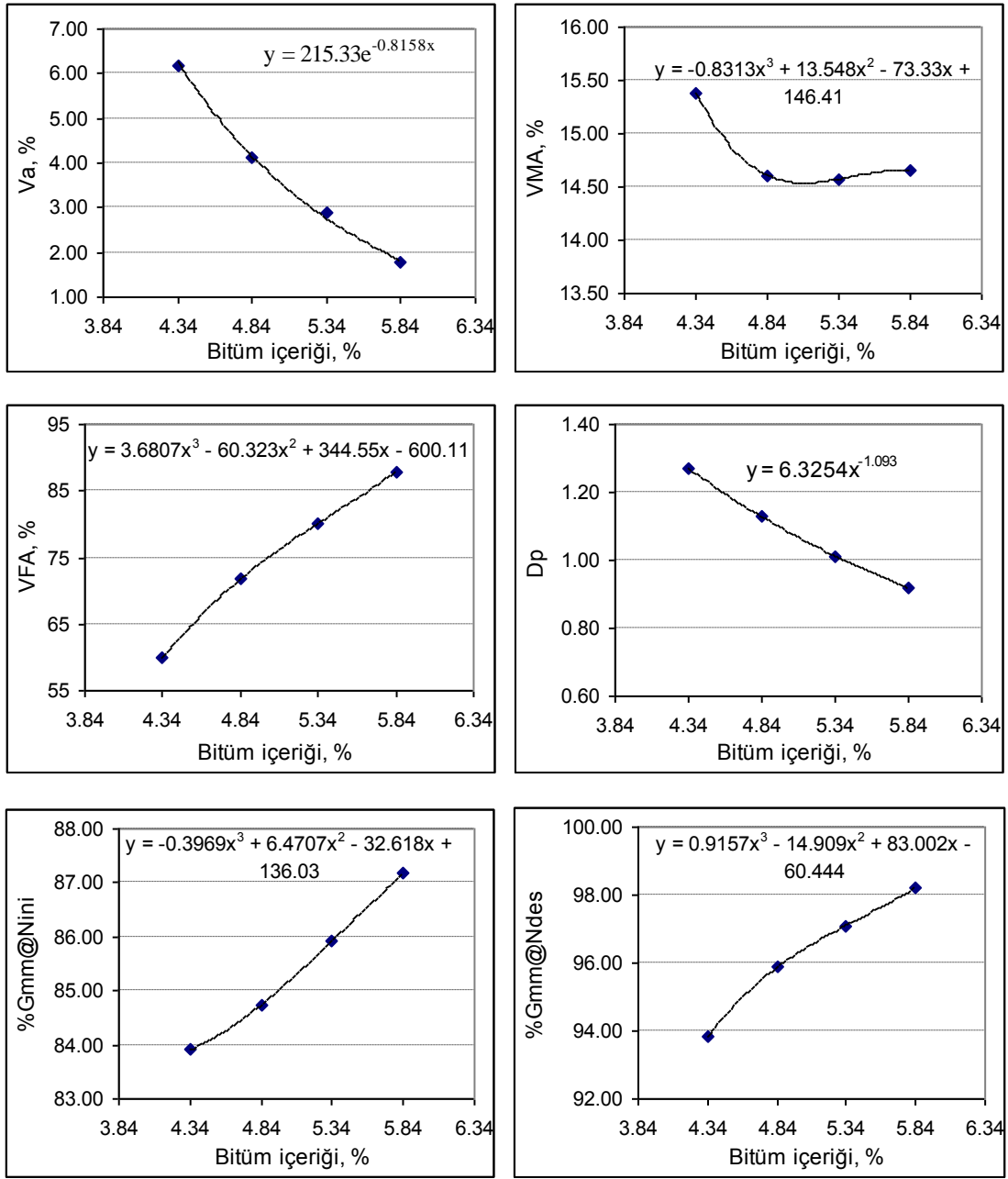
Şekil 5.20. Karışım numunelerinin ortalama yoğunluk eğrileri

Tasarım yoğurma sayısında sıkıştırılan dört farklı asfalt içeriğindeki karışım numunelerinin sıkıştırma karakteristikleri kullanılarak, karışımların hacim ve yoğunluk özellikleri tespit edilmiş ve bu değerler Tablo 5.28’de verilmiştir.

Tablo 5.28. Karışım numunelerinin hacim özellikleri ve yoğunluk değerleri

| % AC (Pb) | Va (%) | VMA (%) | VFA (%) | DP   | % Gmm@Nini. | % Gmm@Ndes. |
|-----------|--------|---------|---------|------|-------------|-------------|
| 4,34      | 6,16   | 15,38   | 59,93   | 1,27 | 83,90       | 93,84       |
| 4,84      | 4,13   | 14,61   | 71,75   | 1,13 | 84,74       | 95,87       |
| 5,34      | 2,90   | 14,57   | 80,13   | 1,01 | 85,93       | 97,10       |
| 5,84      | 1,78   | 14,65   | 87,84   | 0,92 | 87,17       | 98,22       |

Tasarım yoğurma sayısında (Ndes=100) hesaplanan Va, VMA, VFA ve DP değerleri ile yoğunluk değerlerinin, asfalt yüzdelere bağlı olarak değişimini gösteren grafikler çizilerek Şekil 5.21’de gösterilmiştir.



Şekil 5.21. Karışımların hacimsel ve yoğunluk özelliklerinin asfalt içeriği ile değişimi

B<sub>160/220</sub> bağlayıcısı için tasarım bağlayıcı içeriği; karışımın hava boşluğu yüzdesi-asfalt yüzdesi grafiği yardımıyla, boşluk % 4 olacak şekilde %4,88 olarak tespit edilmiştir. Bulunan bu tasarım asfalt bağlayıcı yüzdesine göre, grafikler yardımıyla diğer tasarım değerleri tespit edilerek sonuçları Tablo 5.29’da verilmiş ve Superpave şartname kriterleri ile karşılaştırılmıştır.

**Tablo 5.29.** Karışımların %4,88 tasarım asfalt bağlayıcı içeriğindeki özellikleri

| Karışım Özelliği                        | Sonuç | Şartname Kriteri  |
|---|-------|-------------------|
| Hava Boşluğu Yüzdesi (Va, %)            | 4,02  | 4,0               |
| Agregalar Arası Boşluk Yüzdesi (VMA, %) | 14,59 | Min. 14,0         |
| Asfaltla Dolu Boşluk Yüzdesi (VFA, %)   | 72,49 | 65–75             |
| Filler Oranı (DP)                       | 1,12  | 0,6–1,2 (0,8–1,6) |
| %Gmm@Nini. = 8 (%)                      | 84,82 | Maks. 89          |
| %Gmm@Ndes. = 100 (%)                    | 95,98 | 96                |

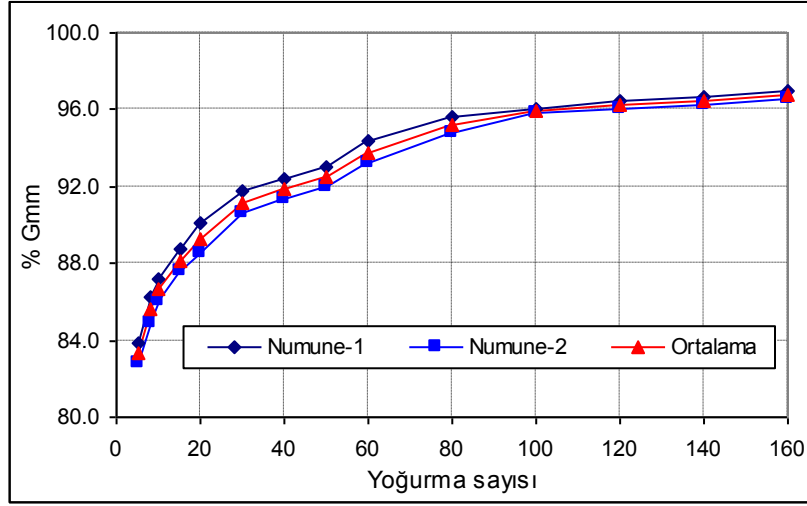
Ayrıca son olarak, tespit edilen tasarım asfalt içeriğinde iki karışım numunesi hazırlanarak maksimum yoğurma sayısında (Nmaks) sıkıştırılmış ve yoğunluk değerleri şartname kriterleri ile karşılaştırılmıştır. Bu amaçla hazırlanan ve maksimum yoğurma sayısında (Nmaks) sıkıştırılan karışım numunelerinin Gmb ve Gmm değerleri Tablo 5.30’da, sıkıştırma karakteristikleri Tablo 5.31’de, yoğunluk eğrileri Şekil 5.22’de ve bu numunelerin farklı yoğurma sayılarındaki (Nini, Ndes ve Nmaks) ortalama maksimum yoğunluk yüzdesi (%Gmm) değerleri de Tablo 5.32’de verilmiştir.

**Tablo 5.30.** Kontrol karışım numunelerinin Gmb ve Gmm değerleri

| %AC (Pb) | Wb (gr) | Numune-1 |            |            |            | Numune-2 |            |            |            | Gmm   |
|----------|---------|----------|------------|------------|------------|----------|------------|------------|------------|-------|
|          |         | A (kuru) | B (doygun) | C (sudaki) | Gmb (ölç.) | A (kuru) | B (doygun) | C (sudaki) | Gmb (ölç.) |       |
| 4,88     | 56,4    | 1152,0   | 1154,4     | 662,6      | 2,342      | 1153,9   | 1155,4     | 663,3      | 2,345      | 2,397 |

**Tablo 5.31.** Numunelerin Nmaks.’da %4,88 bitüm içeriğindeki sıkıştırma karakteristikleri

| Devir Sayısı      | Karışım Numunelerinin Sıkıştırılması |            |                |       |          |            |                |       | Ortalama %Gmm |
|-------------------|--------------------------------------|------------|----------------|-------|----------|------------|----------------|-------|---------------|
|                   | Numune-1                             |            | Wm = 1152,0 gr |       | Numune-2 |            | Wm = 1153,9 gr |       |               |
|                   | H (mm)                               | Gmb (tah.) | Gmb (düz.)     | %Gmm  | H (mm)   | Gmb (tah.) | Gmb (düz.)     | %Gmm  |               |
| Nini= 8           | 74,0                                 | 1,983      | 2,051          | 85,58 | 74,3     | 1,978      | 2,058          | 85,85 | 85,71         |
| 20                | 71,2                                 | 2,062      | 2,133          | 88,99 | 71,6     | 2,053      | 2,135          | 89,09 | 89,04         |
| 40                | 68,5                                 | 2,141      | 2,214          | 92,38 | 69,1     | 2,127      | 2,212          | 92,28 | 92,33         |
| 60                | 67,3                                 | 2,180      | 2,255          | 94,08 | 67,9     | 2,164      | 2,251          | 93,90 | 93,99         |
| 80                | 66,6                                 | 2,203      | 2,279          | 95,07 | 67,1     | 2,191      | 2,279          | 95,06 | 95,07         |
| Ndes= 100         | 66,0                                 | 2,224      | 2,300          | 95,95 | 66,5     | 2,212      | 2,300          | 95,98 | 95,96         |
| 120               | 65,4                                 | 2,244      | 2,321          | 96,83 | 66,1     | 2,224      | 2,313          | 96,50 | 96,66         |
| 140               | 65,1                                 | 2,254      | 2,332          | 97,28 | 65,5     | 2,244      | 2,334          | 97,38 | 97,33         |
| Nmax= 160         | 64,8                                 | 2,265      | 2,342          | 97,73 | 65,2     | 2,255      | 2,345          | 97,83 | 97,78         |
| Gmb(ölçülen)      | 2.342                                |            |                | 2,345 |          |            |                |       |               |
| Düz. Faktörü. (C) | 1,034                                |            |                | 1,040 |          |            |                |       |               |
| Gmm(hesaplanan)   | 2,397                                |            |                |       |          |            |                |       |               |



Şekil 5.22. Karışım numunelerinin Nmaks.'da %4,88 bitüm içeriğindeki yoğunluk eğrileri

Tablo 5.32. Karışım numunelerinin Nmaks.'da %4,88 bitüm içeriğindeki yoğunluk değerleri

| Özellik          | %Gmm@Nini. | %Gmm@Ndes. | %Gmm@Nmaks. |
|------------------|------------|------------|-------------|
| Sonuç            | 85,71      | 95,96      | 97,78       |
| Şartname Kriteri | ≤89,0      | 96,0       | ≤98,0       |

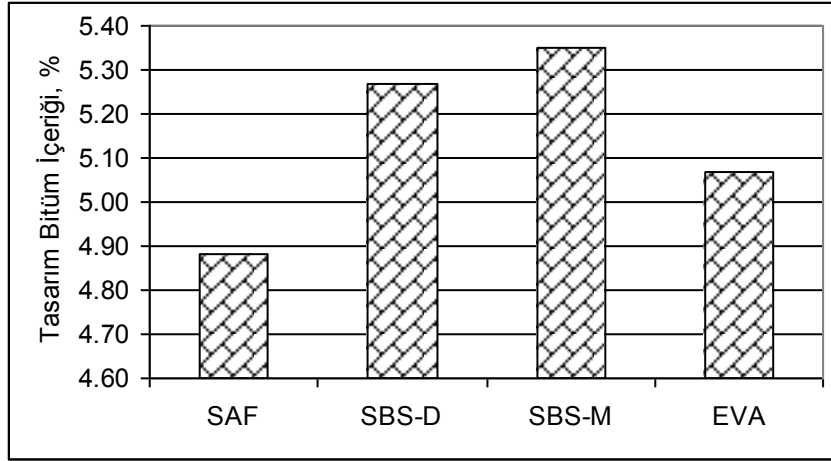
Tablo 5.32 incelendiğinde, seçilmiş olan tasarım agrega gradasyonu (Karışım-3) ile B 160/220 saf bitümü kullanılarak tespit edilen tasarım bağlayıcı içeriğinde (%4,88) hazırlanan ve Nmaks'da sıkıştırılan karışım numunelerinin yoğunluk yüzdesi değerlerini Nini, Ndes ve Nmaks yoğurma sayılarında sağladığı görülmektedir.

#### 5.4.2. Modifiye Bağlayıcılar ile Hazırlanan Karışımlar İçin Tasarım Bağlayıcı İçeriğinin Tespit Edilmesi

MB<sub>SBS-D</sub>, MB<sub>SBS-M</sub> ve MB<sub>EVA</sub> modifiye bitümleri ile hazırlanan karışımların dizayn bağlayıcı içerikleri, Superpave yöntemine uygun olarak B 160/220 bağlayıcısına benzer şekilde belirlenmiştir. Bütün karışımların tasarım bitüm içerikleri ve hacimsel özellikleri Tablo 5.33'de verilmiştir. Ayrıca bitümlü sıcak karışımların tasarım bitüm içerikleri Şekil 5.23'te verilmiştir.

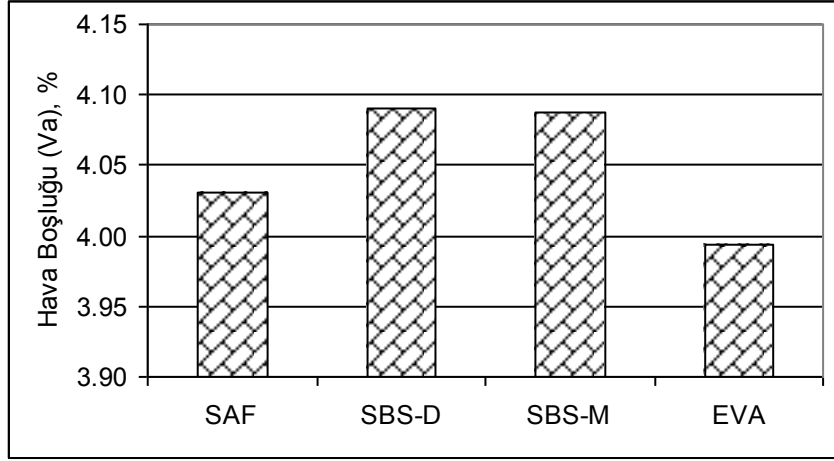
**Tablo 5.33.** Bütün karışımların hacimsel özellikleri

| Özellik       | Karışımda Kullanılan Bağlayıcı Türü |                     |                     |                   |
|---------------|-------------------------------------|---------------------|---------------------|-------------------|
|               | B 160/220                           | MB <sub>SBS-D</sub> | MB <sub>SBS-M</sub> | MB <sub>EVA</sub> |
| Pb (%)        | 4,88                                | 5,27                | 5,35                | 5,07              |
| Va            | 4,04                                | 4,09                | 4,09                | 3,99              |
| VMA           | 14,61                               | 15,39               | 15,50               | 14,86             |
| VFA           | 72,37                               | 73,42               | 73,63               | 73,13             |
| Dp            | 1,07                                | 0,98                | 0,97                | 1,02              |
| %Gmm@Nini=8   | 85,71                               | 85,62               | 85,52               | 85,09             |
| %Gmm@Ndes=100 | 95,96                               | 95,91               | 95,91               | 96,01             |
| %Gmm@Nmax=160 | 97,78                               | 96,76               | 97,34               | 97,75             |



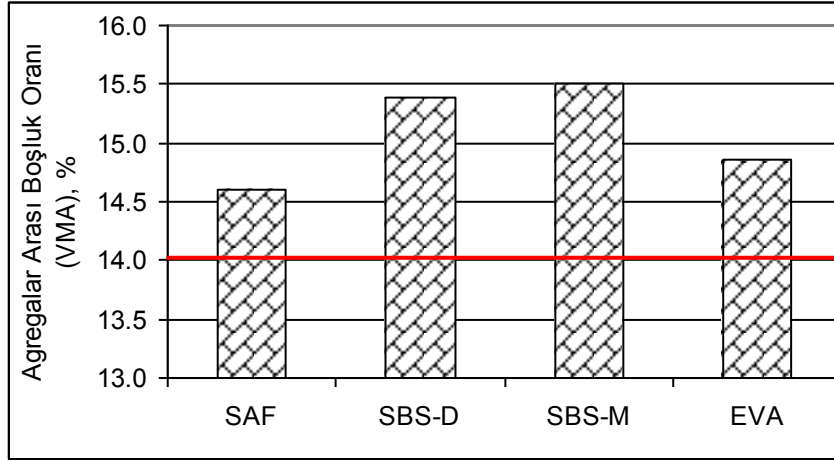
**Şekil 5.23.** Karışımların tasarım bitüm içerikleri

Şekil 5.23'te görüldüğü üzere en düşük tasarım bitüm içeriğine saf bağlayıcı ile hazırlanan karışımın sahip olduğu belirlenmiştir. Modifiye bitümlerle hazırlanan karışımlar içerisinde ise en düşük tasarım bitüm içeriğine EVA modifiyeli bitümlerle hazırlanan karışımların, en yüksek tasarım bitüm içeriğine ise SBS-M modifiyeli bitümlerle hazırlanan karışımların sahip olduğu belirlenmiştir. Karışımların tasarım bitüm içeriklerindeki hava boşlukları Şekil 5.24'te verilmiştir.



Şekil 5.24. Karışımların hava boşluğu (Va) oranları

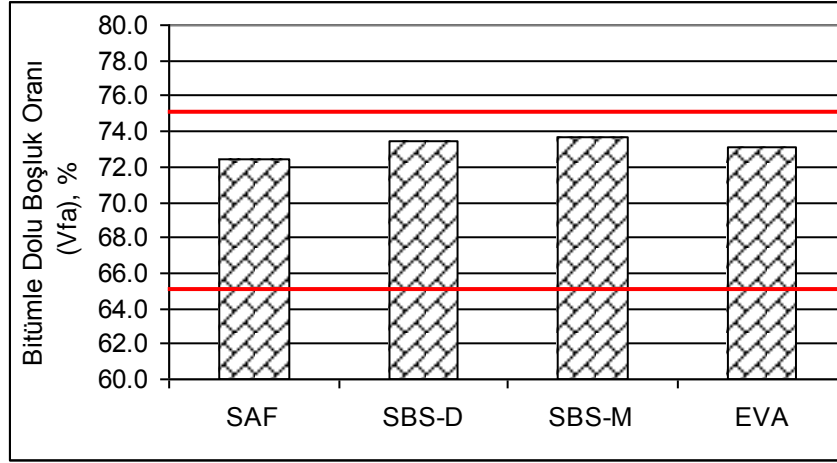
Şekil 5.24 incelendiğinde karışımların hava boşluğu oranlarının tasarıma uygun olarak %4'e yakın olduğu belirlenmiştir. Karışımların tasarım bitüm içeriklerindeki agregalar arası boşluk oranı değerleri Şekil 5.25'te verilmiştir.



Şekil 5.25. Karışımların agregalar arası boşluk oranı (VMA) değerleri

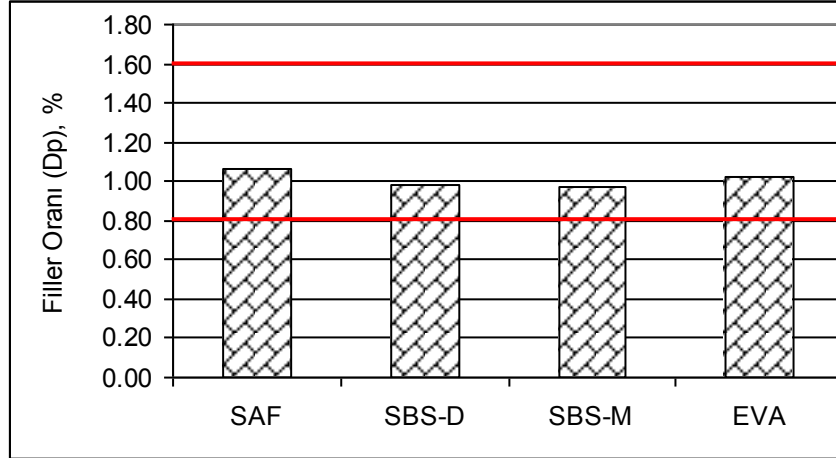
Şekil 5.25'te görüldüğü üzere bütün karışımların tasarım bitüm içeriğindeki agregalar arası boşluk oranı değerlerinin Superpave şartname kriterini sağladığı, 14'ten büyük olduğu belirlenmiştir. Karışımlar içerisinde en düşük tasarım bitüm içeriğindeki agregalar arası boşluk oranı değerine B 160/220 bitümü ile hazırlanan karışımın, en yüksek VMA değerine ise SBS-M modifiyeli bitümü ile hazırlanan karışımların sahip olduğu tespit edilmiştir. Karışımların bitümlü boşluk oranı değerleri Şekil 5.26'da verilmiştir.





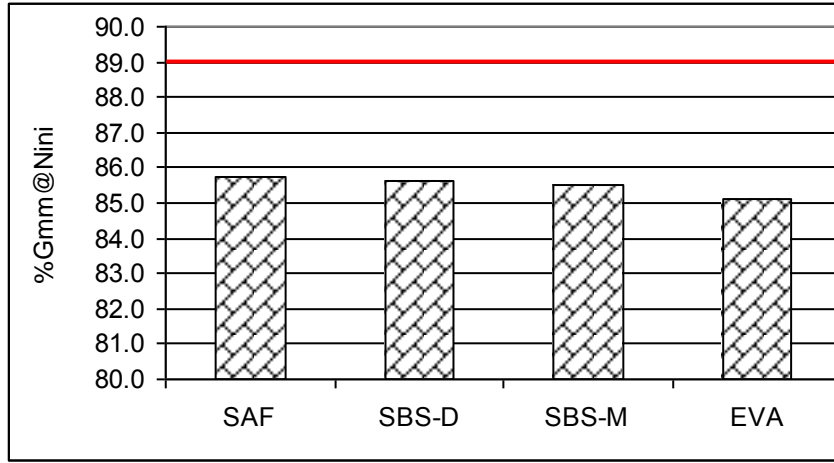
Şekil 5.26. Karışımların bitümle dolu boşluk oranı (VFA) değerleri

Şekil 5.26’da bütün karışımların VFA değerlerinin şartname sınırları arasında (%65-75) olduğu görülmektedir. Karışımlar incelendiğinde en düşük VFA değerine VMA değerleri ile bağlantılı olarak B 160/220 bitümü ile hazırlanan karışımın, en yüksek VFA değerine ise SBS-M modifiyeli bitümü ile hazırlanan karışımların sahip olduğu belirlenmiştir. Karışımların tasarım bitüm içeriklerindeki filler oranı değerleri Şekil 5.27’de verilmiştir.



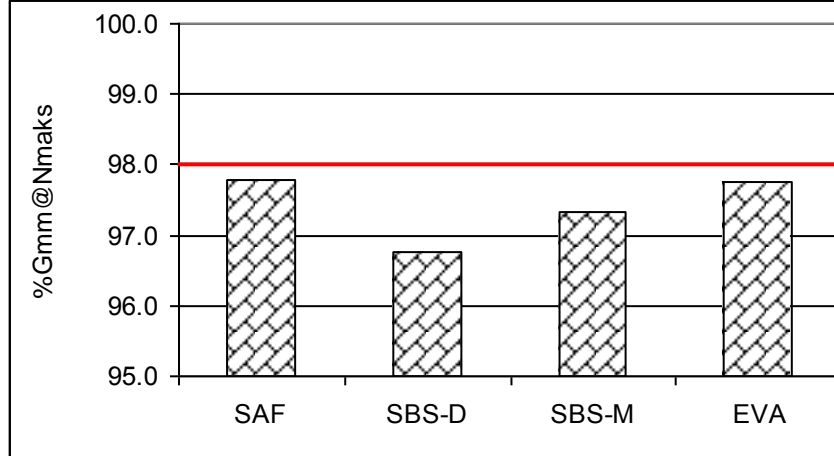
Şekil 5.27. Karışımların filler oranı (Dp) değerleri

Şekil 5.27’de görüldüğü üzere karışımların filler oranı değerlerinin birbirine yakın olduğu belirlenmiştir. Karışımların filler oranı değerlerinin 0,8 ile 1,6 arasında olduğu dolayısıyla Superpave şartname kriterini sağladığı tespit edilmiştir. Karışımların tasarım bitüm içeriklerindeki %Gmm@Nini değerleri Şekil 5.28’de verilmiştir.



Şekil 5.28. Karışımların %Gmm@Nini değerleri

Şekil 5.28’de görüldüğü üzere bütün karışımların şartname kriterini sağladığı, %Gmm@Nini değerlerinin %89’dan az olduğu belirlenmiştir. Karışımların tasarım bitüm içeriklerindeki %Gmm@Nmaks değerleri de Şekil 5.29’da verilmiştir.



Şekil 5.29. Karışımların %Gmm@Nmaks değerleri

Şekil 5.29’da bütün karışımların şartname kriterini sağladığı, %Gmm@Nmaks değerlerinin %98’den az olduğu görülmektedir.

## 5.5. Marshall Stabilite ve Akma Deneý Sonuçları

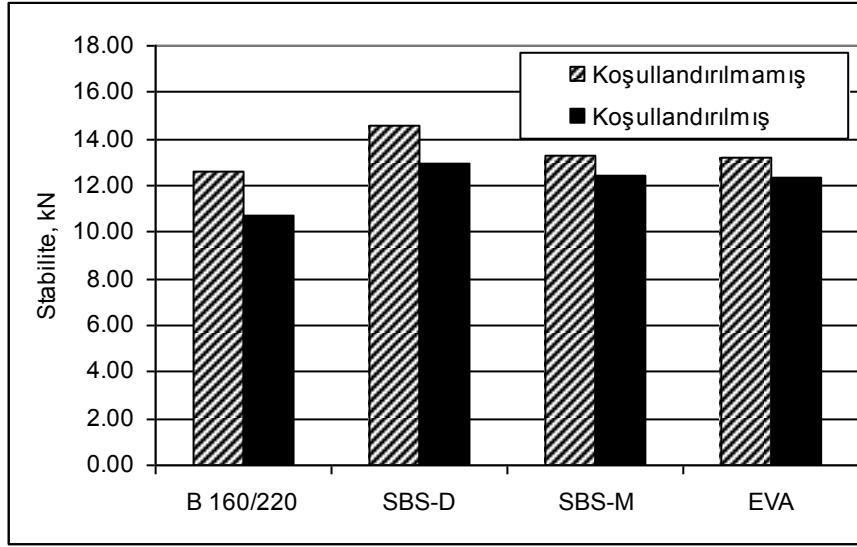
B 160/220 bitümü ve %4 oranında SBS-D, SBS-M ve EVA içeren bitümlü baēlayıcılar kullanılarak tasarım bitüm ieriēinde hazırlanan bitümlü sıcak karışımlar üzerinde Marshall stabilite ve akma deneyi ile nem hasarına karşı dayanımın bir göstergesi olan kalıcı Marshall Stabilitesi deneyi uygulanmıştır. Bütün karışımlar optimum bitüm içeriklerinde ve %4 boşluk oranına sahip olacak şekilde hazırlanmıştır. Numuneler ayrıca koşullandırma işleme tabi tutulmuştur. Normal Marshall stabilite ve akma deneyinde numuneler TS EN 12697–34 standardına göre 60°C suda 40 dakikada bekletilmiştir. Nem hasarına karşı dayanımın bir göstergesi olan Kalıcı Marshall stabilitesi (RMS) deēerini belirlemek amacıyla numuneler 60°C suda 24 saat bekletilmiş daha sonra Marshall stabilite ve akma deneyine tabi tutulmuştur. Çalışmada 60°C suda 24 saat bekletilen numuneler “koşullandırılmış” olarak adlandırılmıştır. Koşullandırılmamış numunelere uygulanan Marshall Stabilite ve akma deney sonuçları Tablo 5.34’de, koşullandırılmış baēlayıcıların deney sonuçları ise Tablo 5.35’te verilmiştir. Ayrıca koşullandırma işleminden önce ve sonra Marshall stabilite deēerlerinin polimer türü ile deēişimi Şekil 5.30’da verilmiştir.

**Tablo 5.34.** Koşullandırılmamış numunelerin Marshall deney sonuçları

| Bağlayıcı Türü      | Numune No | $h_{ort}$ , (mm) | $G_{mb}$ | $G_{mm}$ | $V_a$ (%) | Stabilite, (kN) | Akma, (mm)  | Düzeltilme Faktörü | Düzeltilmiş Stabilite, (kN) | MQ, (kN/mm) |
|---------------------|-----------|------------------|----------|----------|-----------|-----------------|-------------|--------------------|-----------------------------|-------------|
| B 160/220           | 1         | 66,0             | 2,303    | 2,397    | 3,9       | 13,0            | 4,79        | 0,955              | 12,39                       | <b>2,72</b> |
|                     | 2         | 66,2             | 2,302    |          | 4,0       | 13,5            | 4,33        | 0,949              | 12,82                       |             |
|                     | 3         | 66,1             | 2,301    |          | 4,0       | 13,2            | 4,77        | 0,952              | 12,52                       |             |
|                     | Ortalama  |                  |          |          |           |                 | <b>4,63</b> |                    | <b>12,58</b>                |             |
| MB <sub>SBS-D</sub> | 4         | 68,0             | 2,293    | 2,386    | 3,9       | 16,1            | 4,49        | 0,907              | 14,56                       | <b>3,42</b> |
|                     | 5         | 68,2             | 2,294    |          | 3,8       | 17,0            | 3,87        | 0,901              | 15,33                       |             |
|                     | 6         | 68,1             | 2,289    |          | 4,1       | 15,2            | 4,41        | 0,904              | 13,76                       |             |
|                     | Ortalama  |                  |          |          |           |                 | <b>4,26</b> |                    | <b>14,55</b>                |             |
| MB <sub>SBS-M</sub> | 7         | 68,1             | 2,286    | 2,385    | 4,1       | 14,2            | 4,40        | 0,905              | 12,82                       | <b>3,16</b> |
|                     | 8         | 68,2             | 2,292    |          | 3,9       | 15,4            | 4,44        | 0,902              | 13,91                       |             |
|                     | 9         | 68,3             | 2,286    |          | 4,2       | 14,6            | 3,76        | 0,900              | 13,12                       |             |
|                     | Ortalama  |                  |          |          |           |                 | <b>4,20</b> |                    | <b>13,28</b>                |             |
| MB <sub>EVA</sub>   | 10        | 67,9             | 2,295    | 2,394    | 4,1       | 14,1            | 3,91        | 0,909              | 12,81                       | <b>3,36</b> |
|                     | 11        | 67,7             | 2,294    |          | 4,2       | 14,7            | 3,62        | 0,914              | 13,41                       |             |
|                     | 12        | 67,0             | 2,304    |          | 3,8       | 14,5            | 4,27        | 0,930              | 13,46                       |             |
|                     | Ortalama  |                  |          |          |           |                 | <b>3,93</b> |                    | <b>13,22</b>                |             |

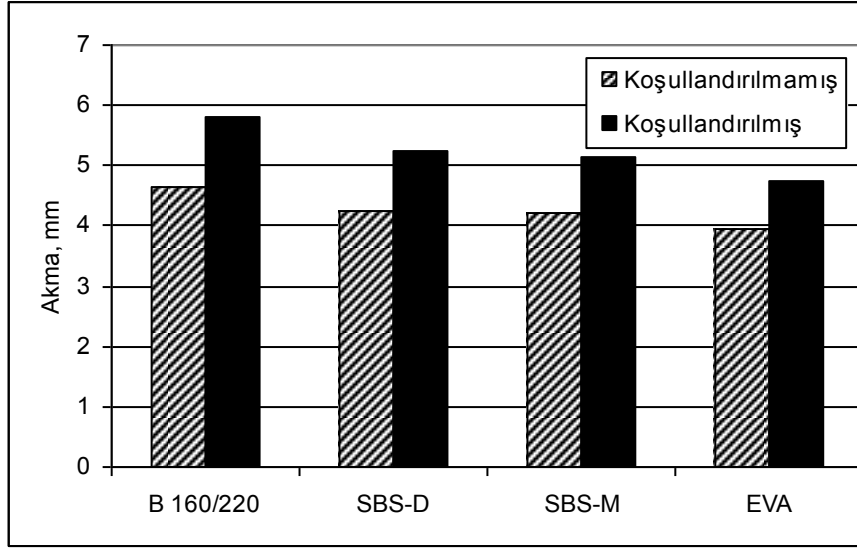
**Tablo 5.35.** Koşullandırılmış numunelerin Marshall deney sonuçları

| Bağlayıcı Türü      | Numune No | $h_{ort}$ , (mm) | $G_{mb}$ | $G_{mm}$ | $V_a$ (%) | Stabilite, (kN) | Akma, (mm)  | Düzeltilme Faktörü | Düzeltilmiş Stabilite, (kN) | MQ, (kN/mm) |
|---------------------|-----------|------------------|----------|----------|-----------|-----------------|-------------|--------------------|-----------------------------|-------------|
| B 160/220           | 1         | 66,1             | 2,300    | 2,397    | 4,1       | 11,0            | 5,75        | 0,951              | 10,48                       | <b>1,84</b> |
|                     | 2         | 66,0             | 2,300    |          | 4,0       | 11,0            | 5,81        | 0,955              | 10,55                       |             |
|                     | 3         | 65,9             | 2,307    |          | 3,8       | 11,7            | 5,90        | 0,956              | 11,15                       |             |
|                     | Ortalama  |                  |          |          |           |                 | <b>5,82</b> |                    | <b>10,73</b>                |             |
| MB <sub>SBS-D</sub> | 4         | 68,1             | 2,294    | 2,386    | 3,9       | 13,9            | 5,40        | 0,903              | 12,57                       | <b>2,46</b> |
|                     | 5         | 68,0             | 2,290    |          | 4,0       | 14,7            | 5,29        | 0,907              | 13,31                       |             |
|                     | 6         | 67,9             | 2,294    |          | 3,9       | 14,2            | 5,08        | 0,908              | 12,90                       |             |
|                     | Ortalama  |                  |          |          |           |                 | <b>5,26</b> |                    | <b>12,93</b>                |             |
| MB <sub>SBS-M</sub> | 7         | 68,3             | 2,294    | 2,385    | 3,8       | 13,5            | 5,07        | 0,900              | 12,13                       | <b>2,42</b> |
|                     | 8         | 68,1             | 2,285    |          | 4,2       | 13,6            | 5,10        | 0,904              | 12,27                       |             |
|                     | 9         | 68,0             | 2,288    |          | 4,1       | 14,2            | 5,24        | 0,907              | 12,91                       |             |
|                     | Ortalama  |                  |          |          |           |                 | <b>5,14</b> |                    | <b>12,44</b>                |             |
| MB <sub>EVA</sub>   | 10        | 67,5             | 2,303    | 2,394    | 3,8       | 13,8            | 5,37        | 0,919              | 12,67                       | <b>2,61</b> |
|                     | 11        | 67,5             | 2,300    |          | 3,9       | 13,6            | 4,02        | 0,918              | 12,52                       |             |
|                     | 12        | 67,8             | 2,289    |          | 4,4       | 13,1            | 4,82        | 0,910              | 11,95                       |             |
|                     | Ortalama  |                  |          |          |           |                 | <b>4,74</b> |                    | <b>12,38</b>                |             |



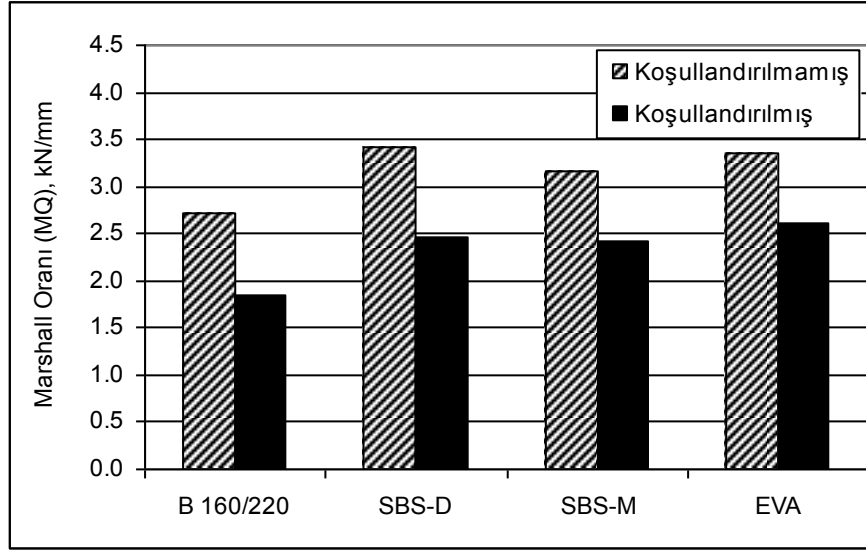
Şekil 5.30. Karışımlarının katkı türüyle stabilite değerlerinin değişimi

Şekil 5.30’da görüldüğü üzere koşullandırma işleminden önce ve sonra en yüksek Stabilite değerlerine  $MB_{SBS-D}$  ile hazırlanan karışımların sahip olduğu belirlenmiştir. En düşük Stabilite değerine ise B 160/220 bitümü ile hazırlanan karışımların sahip olduğu tespit edilmiştir. Koşullandırma nedeniyle karışımların Stabilite değeri azalmıştır. Koşullandırma işleminden önce  $MB_{SBS-D}$ ,  $MB_{SBS-M}$  ve  $MB_{EVA}$  modifiye bitümleri ile hazırlanan karışımların Stabilite değerlerinin B 160/220 bitümü ile hazırlanan karışımlara göre sırasıyla %15,7 %5,6 ve %5,2 oranlarında yüksek olduğu belirlenmiştir. Koşullandırma işleminden sonra ise  $MB_{SBS-D}$ ,  $MB_{SBS-M}$  ve  $MB_{EVA}$  modifiye bitümleri ile hazırlanan karışımların stabilite değerlerinin B 160/220 bitümü ile hazırlanan karışımlara göre sırasıyla %20,5 %15,9 ve %15,4 oranlarında yüksek olduğu belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlardan koşullandırma nedeniyle modifiye bitümlerin etkilerinin arttığı tespit edilmiştir. Ayrıca  $MB_{SBS-D}$  ve  $MB_{EVA}$  modifiye bitümleri ile hazırlanan karışımlardan elde edilen sonuçlar, Şengöz ve Işıkyakar tarafından yapılan çalışmayla benzerlik göstermiştir [79]. Yapılan çalışmada da benzer olarak SBS-D polimerini içeren modifiye bitümlerle hazırlanan karışımların Stabilite değerinin EVA içeren modifiye bitümlerle hazırlanan karışımların Stabilite değerinden yüksek olduğu belirlenmiştir. Polimer modifiye bitümlerle hazırlanan karışımların akma değerleri Şekil 5.31’de verilmiştir.



Şekil 5.31. Karışımlarının katkı türüyle akma değerlerinin değişimi

Şekil 5.31 incelendiğinde koşullandırma öncesi ve sonrasında en yüksek akma değerlerine B 160/220 bağlayıcısı ile hazırlanan karışımların en düşük akma değerlerine ise  $MB_{EVA}$  bağlayıcısı ile hazırlanan karışımların sahip olduğu belirlenmiştir. Koşullandırma nedeniyle stabilite değerleri azalmasına rağmen akma değerlerinin arttığı belirlenmiştir. Koşullandırma öncesinde  $MB_{SBS-D}$ ,  $MB_{SBS-M}$  ve  $MB_{EVA}$  modifiye bitümleri ile hazırlanan karışımların akma değerlerinin B 160/220 bitümü ile hazırlanan karışımların akma değerlerine göre sırasıyla %8,1 %9,3 ve %15,1 oranlarında azalmıştır. Koşullandırma işlemi sonrasında ise  $MB_{SBS-D}$ ,  $MB_{SBS-M}$  ve  $MB_{EVA}$  modifiye bitümleri ile hazırlanan karışımların akma değerlerinin B 160/220 bitümü ile hazırlanan karışımların akma değerlerine göre sırasıyla %9,7 %11,7 ve %18,6 oranlarında azalmıştır. Elde edilen sonuçlardan koşullandırma nedeniyle akma değerlerinin arttığı tespit edilmiştir. Marshall stabilite değerinin akma değerine bölümünden elde edilen Marshall oranı (MQ) değerlerinin katkı kullanımı ile değişimi Şekil 5.32’de verilmiştir.

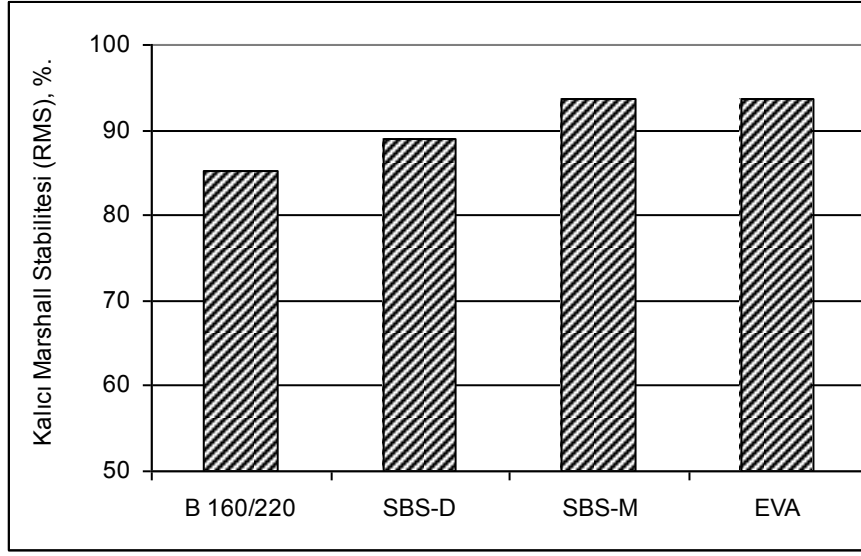


Şekil 5.32. Karışımlarının Marshall oranı değerlerinin katkı kullanımı ile değişimi

Şekil 5.32 incelendiğinde en yüksek Marshall oranı (MQ) değerine koşullandırma işleminden önce  $MB_{SBS-D}$  modifiye bitümü ile hazırlanan karışımın, koşullandırma işleminden sonra ise  $MB_{EVA}$  modifiye bitümü ile hazırlanan karışımın sahip olduğu belirlenmiştir. Koşullandırma işleminden sonra  $MB_{EVA}$  modifiye bitümü ile hazırlanan karışımın MQ değerinin en yüksek olması, en düşük akma değerine sahip olmasından kaynaklanmıştır. Koşullandırma işleminden önce ve sonra en düşük MQ değerine, en düşük stabilite ve en yüksek akma değerlerine sahip olduğu için B 160/220 bitümü ile hazırlanan karışımların sahip olduğu belirlenmiştir. Koşullandırma nedeniyle karışımların MQ değerleri azalmıştır.

Koşullandırma öncesinde  $MB_{SBS-D}$ ,  $MB_{SBS-M}$  ve  $MB_{EVA}$  modifiye bitümleri ile hazırlanan karışımların MQ değerleri, B 160/220 bitümü ile hazırlanan karışımların MQ değerlerine göre sırasıyla %25,8 %16,5 ve %23,8 oranlarında artmıştır. Koşullandırma işlemi sonrasında ise  $MB_{SBS-D}$ ,  $MB_{SBS-M}$  ve  $MB_{EVA}$  modifiye bitümleri ile hazırlanan karışımların MQ değerleri, B 160/220 bitümü ile hazırlanan karışımların MQ değerlerine göre sırasıyla %33,4 %31,4 ve %41,8 oranlarında azalmıştır. MQ değerleri sonucunda koşullandırma öncesinde  $MB_{SBS-D}$  ile hazırlanan karışımların, koşullandırma sonrasında ise  $MB_{EVA}$  ile hazırlanan karışımların rijitliğinin daha yüksek olacağı söylenebilmektedir. Nem hasarına karşı dayanımın bir göstergesi olan Kalıcı Marshall Stabilesi değerlerinin katkı türü ile değişimi ise Şekil 5.33'te verilmiştir.





Şekil 5.33. Karışımlarının RMS değerlerinin katkı kullanımı ile değişimi

Şekil 5.33'te görülen kalıcı Marshall stabilitesi değerleri incelendiğinde karışımlar içerisinde en düşük RMS değerine B 160/220 bitümü ile hazırlanan karışımların, en yüksek RMS değerine ise  $MB_{SBS-M}$  ve  $MB_{EVA}$  bitümleri ile hazırlanan karışımların sahip olduğu belirlenmiştir.  $MB_{SBS-D}$ ,  $MB_{SBS-M}$  ve  $MB_{EVA}$  modifiye bitümleri ile hazırlanan karışımların RMS değerleri B 160/220 bitümü ile hazırlanan karışımın RMS değerlerine göre sırasıyla %4,2 %9,8 ve %9,8 oranlarında artmıştır. Bu durum katkı türleri içerisinde nem hasarına karşı dayanımı en yüksek olan katkıların SBS-M ve EVA olduğunu, en düşük etkiye ise SBS-D katkı maddesinin sahip olduğunu göstermektedir.

Marshall deneyleri sonucunda Stabilitate açısından en üstün katkının SBS-D, akma açısından EVA, MQ açısından koşullandırma öncesinde SBS-D sonrasında EVA ve nem hasarına karşı dayanım bakımından SBS-M ve EVA olduğu söylenebilmektedir. Marshall deneyinin tanımlandığı EN 12697-34 standardına göre üç numunenin Marshall Stabilitate değerleri arasındaki farkın ortalamadan %15, akma değerleri arasındaki farkın ortalamadan %20 az olması deneyin geçerli olduğunu göstermektedir. Bütün karışımların bu şartları sağladığı, yapılan deneylerin geçerli olduğu tespit edilmiştir.

## 5.6. Çekme Dayanımı Oranı Denev Sonuçları

B 160/220 bitümü ve üç farklı polimer modifiye bitümü ile dizayn bitüm içeriklerinde hazırlanan karışımlar üzerinde AASHTO T 283 standardına uygun olarak çekme dayanımı oranı deneyi uygulanarak karışımların nem hasarına karşı dayanımları belirlenmiştir. Her bir karışım için  $\%7 \pm 0,5$  boşluk oranına sahip olacak şekilde 9 adet numune hazırlanmıştır. AASHTO T 283 standardına uygun olarak karışımların nem hasarına karşı dayanımlarının tespitinde kullanılacak numuneler hazırlanırken yoğurmalı presle 45 devirlik sıkıştırma işlemi uygulanmıştır. Karışımların kısa dönem yaşlandırılmasında numuneler 16 saat süresince 60°C sıcaklığa sahip etüvde, ardından sıkıştırma sıcaklığında iki saat bekletilmiştir. Numuneler 24 saat oda sıcaklığında soğumaya bırakılmış ardından numunelerin hacimsel özellikleri belirlenerek boşluk oranları birbirine yakın olacak şekilde gruplandırılmıştır. Karışım numunelerinden üçer tanesine vakum uygulanarak boşluklarının  $\%70-80$  oranında suyla dolması sağlanmıştır. Bu dovgunluk oranını sağlamak amacıyla koşullandırmaya maruz bırakılacak numunelerin hepsine 5 dakika süresince vakum uygulanmıştır. Vakum uygulanan numuneler streç film ile kaplanmış, içerisinde 10 ml. su bulunan poşetlere konularak poşetlerin ağızı iyice kapatılmıştır. Numuneler -18°C sıcaklıktaki dondurucuda 16 saat bekletilmiş ardından 60°C'deki suda 24 saat bekletilmiştir. Bu sürenin sonunda numuneler poşetten ve streç filmden çıkarılmış ve 25°C'deki suda 2 saat bekletilerek kırılmıştır. Koşullandırılmamış numunelerde 25°C'deki suda 2 saat bekletilerek Marshall deney aletinde kırılmıştır. Ayrıca koşullandırılmamış numunelerden 3 tanesi  $0\pm 1^\circ\text{C}$  sıcaklıkta 6 saat bekletilmiş ve kırılmıştır. Kırma işlemi süresince numunelere 2 in/dakika'lık (50,8 mm/dak) sabit yükleme hızı uygulanmıştır. Maksimum yük değerleri yardımıyla çekme dayanımı değerleri Formül 4.36 kullanılarak, çekme dayanımı oranları ise Formül 4.37 kullanılarak belirlenmiştir.

Koşullandırılmamış 0°C sıcaklıkta kırılan numunelere uygulanan deneylerden elde edilen sonuçlar Tablo 5.36'da, 25°C sıcaklıkta kırılan numunelerden elde edilen sonuçlar Tablo 5.37'de, koşullandırılmış ve 25°C sıcaklıkta kırılan numunelerden elde edilen sonuçlar ise Tablo 5.38'de verilmiştir. Karışımların çekme dayanımı değerleri Şekil 5.34'te verilmiştir.

**Tablo 5.36.** Koşullandırılmamış numunelere 0°C sıcaklıkta uygulanan çekme dayanımı oranı deney sonuçları

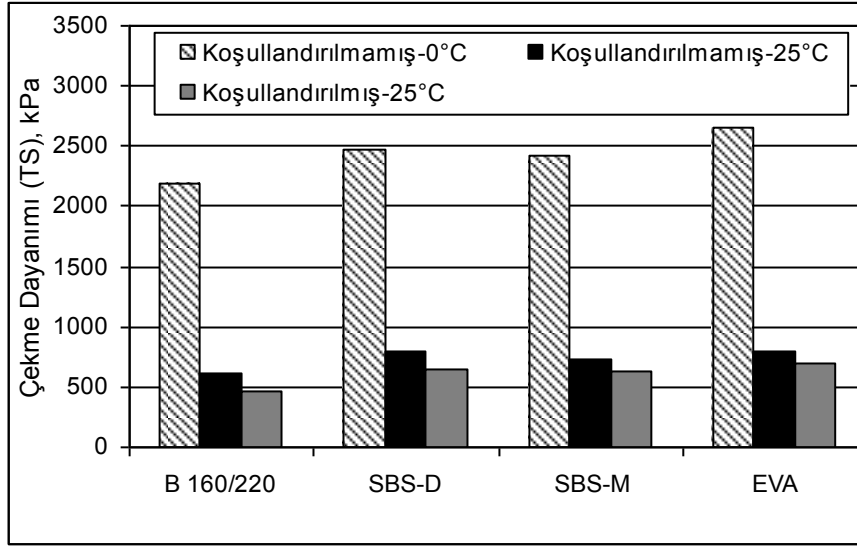
| Bağlayıcı Türü      | Numune No | $h_{ort}$ , (mm) | Havadaki Ağırlık, (gr) | Sudaki Ağırlık, (gr) | Doygun Ku. Yüz. Ağ., (gr) | Gmb   | Gmm   | Boşluk, (%) | Maksimum Yük, (kN) | Çekme Dayanımı, (kPa) |
|---------------------|-----------|------------------|------------------------|----------------------|---------------------------|-------|-------|-------------|--------------------|-----------------------|
| B 160/220           | 1         | 68,0             | 1152,2                 | 646,2                | 1163,5                    | 2,227 | 2,397 | 7,08        | 22,78              | 2133,8                |
|                     | 2         | 68,1             | 1153,9                 | 647,9                | 1164,3                    | 2,235 |       | 6,78        | 23,39              | 2186,6                |
|                     | 3         | 68,4             | 1152,7                 | 647,5                | 1163,8                    | 2,233 |       | 6,86        | 23,99              | 2234,0                |
|                     | Ortalama  |                  |                        |                      |                           |       |       |             |                    | <b>2184,8</b>         |
| MB <sub>SBS-D</sub> | 4         | 70,4             | 1155,2                 | 646,2                | 1167,8                    | 2,215 | 2,386 | 7,18        | 26,33              | 2381,1                |
|                     | 5         | 70,4             | 1153,9                 | 646,9                | 1166,3                    | 2,222 |       | 6,89        | 27,85              | 2520,7                |
|                     | 6         | 70,5             | 1154,7                 | 646,5                | 1165,8                    | 2,224 |       | 6,81        | 27,99              | 2529,6                |
|                     | Ortalama  |                  |                        |                      |                           |       |       |             |                    | <b>2477,2</b>         |
| MB <sub>SBS-M</sub> | 7         | 70,4             | 1156,8                 | 644,5                | 1166,6                    | 2,216 | 2,385 | 7,10        | 26,22              | 2372,2                |
|                     | 8         | 70,5             | 1155,1                 | 646,1                | 1165,9                    | 2,222 |       | 6,83        | 27,32              | 2469,3                |
|                     | 9         | 70,4             | 1155,8                 | 645,7                | 1166,9                    | 2,218 |       | 7,02        | 26,70              | 2414,5                |
|                     | Ortalama  |                  |                        |                      |                           |       |       |             |                    | <b>2418,7</b>         |
| MB <sub>EVA</sub>   | 10        | 70,1             | 1152,8                 | 647,3                | 1165,5                    | 2,225 | 2,394 | 7,08        | 28,52              | 2592,9                |
|                     | 11        | 69,8             | 1151,3                 | 648,5                | 1166,3                    | 2,223 |       | 7,12        | 29,54              | 2695,6                |
|                     | 12        | 70,1             | 1153,2                 | 647,9                | 1166,3                    | 2,225 |       | 7,08        | 29,51              | 2681,3                |
|                     | Ortalama  |                  |                        |                      |                           |       |       |             |                    | <b>2656,6</b>         |

**Tablo 5.37.** Koşullandırılmamış numunelere 25°C sıcaklıkta uygulanan çekme dayanımı oranı deney sonuçları

| Bağlayıcı Türü      | Numune No | $h_{ort}$ , (mm) | Havadaki Ağırlık, (gr) | Sudaki Ağırlık, (gr) | Doygun Ku. Yüz. Ağ., (gr) | Gmb   | Gmm   | Boşluk, (%) | Maksimum Yük, (kN) | Çekme Dayanımı, (kPa) |
|---------------------|-----------|------------------|------------------------|----------------------|---------------------------|-------|-------|-------------|--------------------|-----------------------|
| B 160/220           | 1         | 68,5             | 1152,7                 | 648,2                | 1163,9                    | 2,235 | 2,397 | 6,75        | 6,71               | 623,9                 |
|                     | 2         | 68,1             | 1153,1                 | 647,0                | 1163,6                    | 2,232 |       | 6,88        | 6,60               | 617,0                 |
|                     | 3         | 68,4             | 1152,5                 | 646,1                | 1164,2                    | 2,224 |       | 7,20        | 6,47               | 602,5                 |
|                     | Ortalama  |                  |                        |                      |                           |       |       |             |                    | <b>614,5</b>          |
| MB <sub>SBS-D</sub> | 4         | 70,7             | 1155,3                 | 645,7                | 1166,9                    | 2,217 | 2,386 | 7,10        | 8,84               | 796,4                 |
|                     | 5         | 70,5             | 1154,8                 | 645,0                | 1166,2                    | 2,216 |       | 7,14        | 8,93               | 806,8                 |
|                     | 6         | 70,5             | 1155,8                 | 645,1                | 1165,4                    | 2,221 |       | 6,90        | 8,60               | 777,3                 |
|                     | Ortalama  |                  |                        |                      |                           |       |       |             |                    | <b>793,5</b>          |
| MB <sub>SBS-M</sub> | 7         | 70,3             | 1155,7                 | 645,2                | 1166,1                    | 2,219 | 2,385 | 6,97        | 7,96               | 720,9                 |
|                     | 8         | 70,6             | 1156,3                 | 645,3                | 1166,7                    | 2,218 |       | 7,02        | 8,54               | 770,1                 |
|                     | 9         | 70,5             | 1156,7                 | 645,2                | 1166,4                    | 2,219 |       | 6,95        | 7,90               | 714,1                 |
|                     | Ortalama  |                  |                        |                      |                           |       |       |             |                    | <b>735,0</b>          |
| MB <sub>EVA</sub>   | 7         | 69,8             | 1152,8                 | 647,8                | 1166,1                    | 2,224 | 2,394 | 7,09        | 9,06               | 826,7                 |
|                     | 8         | 69,7             | 1152,5                 | 650,0                | 1166,6                    | 2,231 |       | 6,81        | 8,79               | 802,9                 |
|                     | 9         | 70,1             | 1152,3                 | 648,9                | 1166,5                    | 2,226 |       | 7,01        | 8,34               | 758,1                 |
|                     | Ortalama  |                  |                        |                      |                           |       |       |             |                    | <b>795,9</b>          |

**Tablo 5.38.** Koşullandırılmış numunelere 25°C sıcaklıkta uygulanan çekme dayanımı oranı deney sonuçları

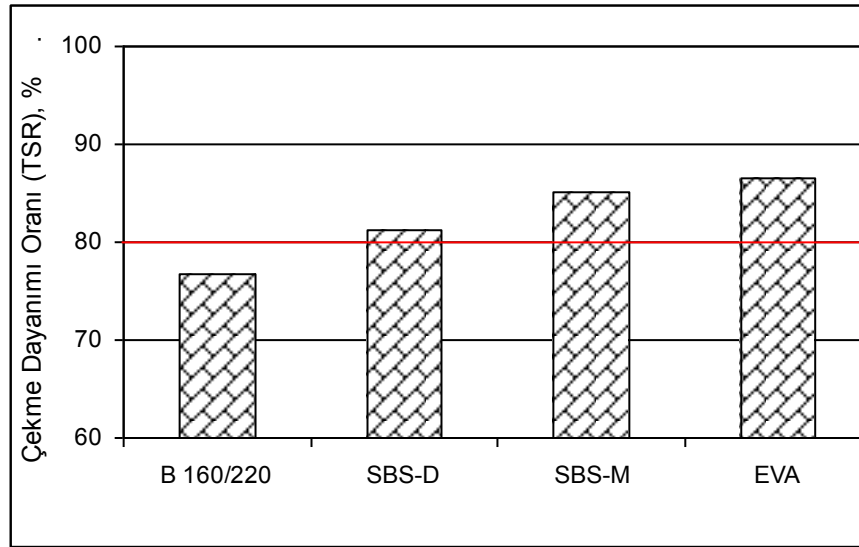
| Bağlayıcı Türü      | Numune No | $h_{ort}$ , (mm) | Havadaki Ağırlık, (gr) | Sudaki Ağırlık, (gr) | Doygun Ku. Yüz. Ağ., (gr) | Gmb   | Gmm   | Boşluk, (%) | Maksimum Yük, (kN) | Çekme Dayanımı, (kPa) |
|---------------------|-----------|------------------|------------------------|----------------------|---------------------------|-------|-------|-------------|--------------------|-----------------------|
| B 160/220           | 1         | 68,4             | 1152,6                 | 647,2                | 1163,8                    | 2,231 | 2,397 | 6,92        | 5,22               | 486,1                 |
|                     | 2         | 68,5             | 1153,6                 | 646,6                | 1164,4                    | 2,228 |       | 7,06        | 4,95               | 460,3                 |
|                     | 3         | 68,2             | 1152,4                 | 647,1                | 1164,1                    | 2,229 |       | 7,01        | 5,03               | 469,5                 |
|                     | Ortalama  |                  |                        |                      |                           |       |       |             |                    | <b>472,0</b>          |
| MB <sub>SBS-D</sub> | 4         | 70,6             | 1154,5                 | 647,3                | 1167,2                    | 2,221 | 2,386 | 6,93        | 7,20               | 649,9                 |
|                     | 5         | 70,6             | 1154,3                 | 645,8                | 1165,9                    | 2,219 |       | 6,98        | 7,35               | 663,4                 |
|                     | 6         | 70,4             | 1154,4                 | 645,9                | 1166,6                    | 2,217 |       | 7,08        | 6,87               | 621,9                 |
|                     | Ortalama  |                  |                        |                      |                           |       |       |             |                    | <b>645,1</b>          |
| MB <sub>SBS-M</sub> | 7         | 70,4             | 1155,2                 | 646,5                | 1166,8                    | 2,220 | 2,385 | 6,91        | 7,05               | 637,8                 |
|                     | 8         | 70,6             | 1153,9                 | 644,1                | 1165,3                    | 2,214 |       | 7,17        | 6,55               | 590,7                 |
|                     | 9         | 70,7             | 1154,3                 | 645,3                | 1165,7                    | 2,218 |       | 7,00        | 7,17               | 646,0                 |
|                     | Ortalama  |                  |                        |                      |                           |       |       |             |                    | <b>624,8</b>          |
| MB <sub>EVA</sub>   | 7         | 70,0             | 1152,4                 | 648,2                | 1165,5                    | 2,228 | 2,394 | 6,95        | 7,55               | 686,7                 |
|                     | 8         | 69,2             | 1150,8                 | 648,7                | 1166,0                    | 2,225 |       | 7,07        | 7,83               | 720,4                 |
|                     | 9         | 69,8             | 1153,0                 | 648,9                | 1165,6                    | 2,231 |       | 6,79        | 7,23               | 659,4                 |
|                     | Ortalama  |                  |                        |                      |                           |       |       |             |                    | <b>688,8</b>          |



Şekil 5.34. Karışımların çekme dayanımı değerleri

Şekil 5.34'te görüldüğü üzere en yüksek çekme dayanımı değerine MB<sub>EVA</sub> bağlayıcısı ile hazırlanan karışımların, en düşük çekme dayanımı değerine B 160/220 bağlayıcısı ile hazırlanan karışımların sahip olduğu belirlenmiştir. Koşullandırılmış numuneler üzerinde 25°C sıcaklıkta, koşullandırılmış numuneler üzerinde 0°C sıcaklıkta yapılan deneylerden MB<sub>SBS-D</sub> ve MB<sub>SBS-M</sub> bağlayıcıları ile hazırlanan karışımların çekme dayanımı değerlerinin birbirine yakın olduğu tespit edilmiştir. Koşullandırılmamış numuneler üzerinde 25°C sıcaklıkta yapılan deneylerden ise MB<sub>SBS-D</sub> ve MB<sub>EVA</sub> bağlayıcıları kullanılarak hazırlanan karışımların çekme dayanımı değerlerinin birbirine yakın olduğu tespit edilmiştir. Koşullandırılmamış numuneler üzerinde 0°C sıcaklıkta uygulanan deneyler sonucunda MB<sub>SBS-D</sub>, MB<sub>SBS-M</sub> ve MB<sub>EVA</sub> bitümleri ile hazırlanan karışımların çekme dayanımı değerlerinin B 160/220 bitümü ile hazırlanan karışımın çekme dayanımı değerinden sırasıyla %29,1 %19,6 ve %29,5 oranında arttığı tespit edilmiştir. Koşullandırılmamış numuneler üzerinde 25°C sıcaklıkta yapılan çekme dayanımı deneyleri sonucunda MB<sub>SBS-D</sub>, MB<sub>SBS-M</sub> ve MB<sub>EVA</sub> bitümleri ile hazırlanan karışımların çekme dayanımı değerlerinin B 160/220 bitümü ile hazırlanan karışımın çekme dayanımı değerinden sırasıyla %36,7 %32,4 ve %45,9 oranında arttığı tespit edilmiştir. Koşullandırılmamış numuneler üzerinde 25°C sıcaklıkta yapılan çekme dayanımı deneyleri sonucunda ise MB<sub>SBS-D</sub>, MB<sub>SBS-M</sub> ve MB<sub>EVA</sub> bitümleri ile hazırlanan karışımların çekme dayanımı değerlerinin B 160/220 bitümü ile hazırlanan karışımın çekme dayanımı değerinden sırasıyla %13,4 %10,7 ve %21,6 oranında arttığı tespit edilmiştir.

Koşullandırılmamış karışımların 0°C sıcaklıktaki çekme dayanımı değerinin 25°C sıcaklıktaki çekme dayanımı değerine oranlanması ile belirlenen sıcaklık indeksi değerleri incelendiğinde B 160/220 saf bitümü ve MB<sub>SBS-D</sub>, MB<sub>SBS-M</sub> ve MB<sub>EVA</sub> modifiye bitümleri ile hazırlanan karışımların sıcaklık indeksi değerlerinin sırasıyla 3.6, 3.1, 3.3 ve 3.3 olduğu belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlardan çekme dayanımı değerlerinin sıcaklıktan en az etkilendiği karışımın MB<sub>SBS-D</sub> bitümü ile hazırlanan karışım olduğu tespit edilmiştir. Koşullandırılmamış numunelerden 25°C sıcaklıkta elde edilen çekme dayanımı değerlerinin koşullandırılmış numunelerden 25°C sıcaklıkta elde edilen çekme dayanımı değerlerine oranlanması ile nem hasarına karşı bitümlü sıcak karışımların dayanımının bir göstergesi olan çekme dayanımı oranı (TSR) değerleri belirlenmiştir. Elde edilen TSR değerleri Şekil 5.35'te verilmiştir.



Şekil 5.35. Karışımlarının çekme dayanımı oranlarının katkı kullanımı ile değişimi

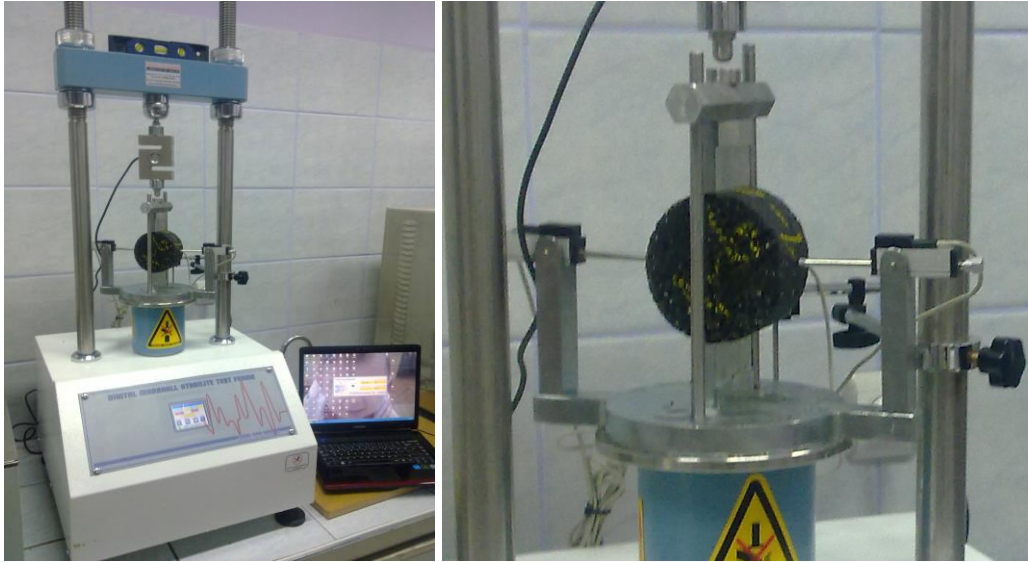
Nem hasarına karşı dayanımın bir göstergesi olan çekme dayanımı oranları incelendiğinde (Şekil 5.35) en yüksek değere MB<sub>EVA</sub> bitümü ile hazırlanan karışımın, en düşük değere ise B 160/220 bitümü ile hazırlanan karışımın sahip olduğu belirlenmiştir. TSR sonuçları değerlendirildiğinde B 160/220 bitümü ile hazırlanan karışımın dışında bütün karışımların TSR değerlerinin Superpave şartname limiti olan %80'den büyük olduğu belirlenmiştir. MB<sub>SBS-D</sub>, MB<sub>SBS-M</sub> ve MB<sub>EVA</sub> bitümleri ile hazırlanan karışımların TSR değerlerinin B 160/220 bitümü ile hazırlanan karışımın TSR değerine göre sırasıyla %5,8 % 10,7 ve % 12,7 oranlarında daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar

RMS sonuçlarıyla benzerlik göstermiştir. Bu değerlerden yola çıkarak nem hasarına karşı en yüksek dayanımın MB<sub>EVA</sub> bitümü ile hazırlanan karışım olacağı söylenebilmektedir.

### 5.7. Tokluk İndeksi Deney Sonuçları

Çalışmada çekme dayanımı deneyine tabi tutulan numunelerde meydana gelen yatay deformasyonlar, deney düzeneğine yerleştirilen iki adet LVDT yardımıyla belirlenmiştir. Yatay deformasyonlar ve yük verileri cihazda bulunan veri toplama sistemi yardımıyla eş zamanlı olarak elde edilmiştir. Çalışmada 25°C sıcaklıkta koşullandırılmamış numunelerin tokluk indeksi değerleri belirlenmiştir. Koşullandırılmış numuneler üzerinde uygulanan ve 25° sıcaklıkta yapılan deneylerde karışımlar üzerinde fark gözlenmediğinden incelenmemiştir. 0°C sıcaklıkta yapılan deneylerde ise karışımların rijitlikleri arttığından yatay deformasyonlar tespit edilememiştir.

Deney düzeneği Şekil 5.36'da görülmektedir. Deneyde yükleme hızı 2 inç/dakikadır (50,8 mm/dakika).

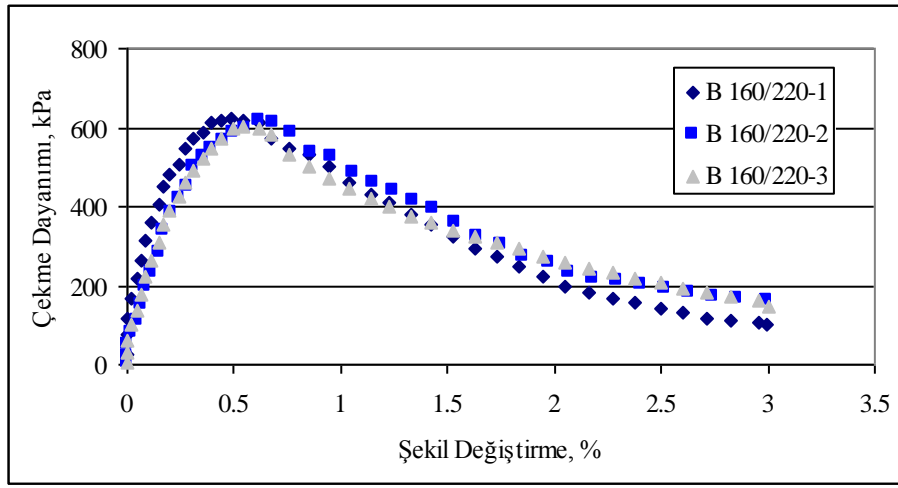


Şekil 5.36. Tokluk indeksi deney düzeneği

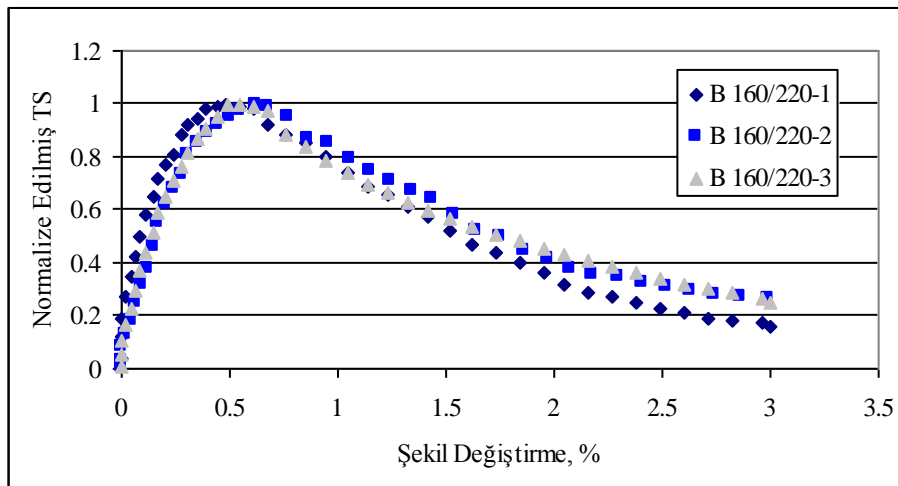
Yatay deformasyonlar yardımıyla yatay birim şekil değişimleri ( $\epsilon$ ) elde edilirken uygulanan yük yardımıyla Formül 4.36 kullanılarak çekme mukavemeti elde edilmiştir. Maksimum çekme mukavemeti değeri 1 kabul edilip diğer oranlar belirlenerek indirekt çekme değerleri normalize edilmiştir. Bu çalışmada %3'lük birim şekil değiştirme temel



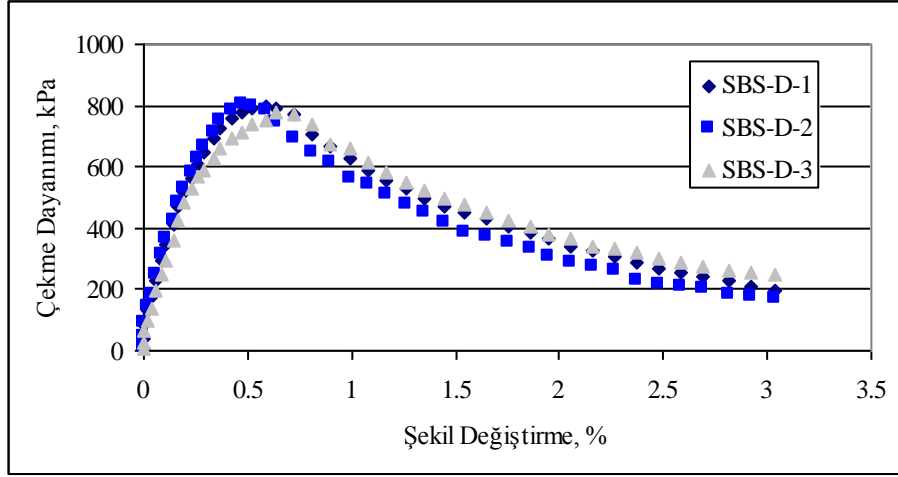
alınarak hesaplama yapılmıştır. B 160/220 bitümü ile hazırlanan karışımların çekme dayanımı - şekil değiştirme ilişkisi Şekil 5.37’de, normalize edilmiş çekme dayanımı (TS) - şekil değiştirme ilişkisi ise Şekil 5.38’de verilmiştir. SBS-D modifiyeli bitüm ile hazırlanan karışımların çekme dayanımı - şekil değiştirme ilişkisi Şekil 5.39’da, normalize edilmiş TS - şekil değiştirme ilişkisi ise Şekil 5.40’da verilmiştir. SBS-M modifiyeli bitüm ile hazırlanan karışımların çekme dayanımı - şekil değiştirme ilişkisi Şekil 5.41’de, normalize edilmiş TS - şekil değiştirme ilişkisi ise Şekil 5.42’de verilmiştir. EVA modifiyeli bitüm ile hazırlanan karışımların çekme dayanımı - şekil değiştirme ilişkisi Şekil 5.43’te, normalize edilmiş TS - şekil değiştirme ilişkisi ise Şekil 5.44’te verilmiştir.



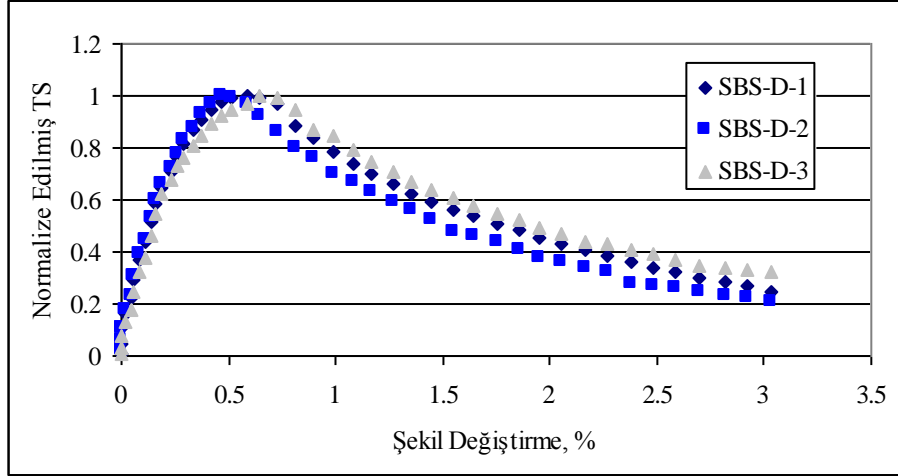
Şekil 5.37. B 160/220 bitümü ile hazırlanan karışımların çekme dayanımı - şekil değiştirme ilişkisi



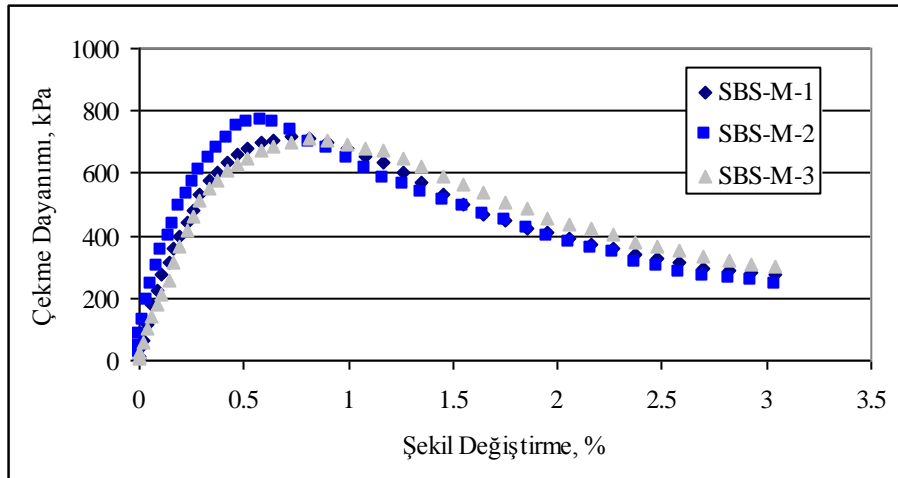
Şekil 5.38. B 160/220 bitümü ile hazırlanan karışımların normalize edilmiş TS - şekil değiştirme ilişkisi



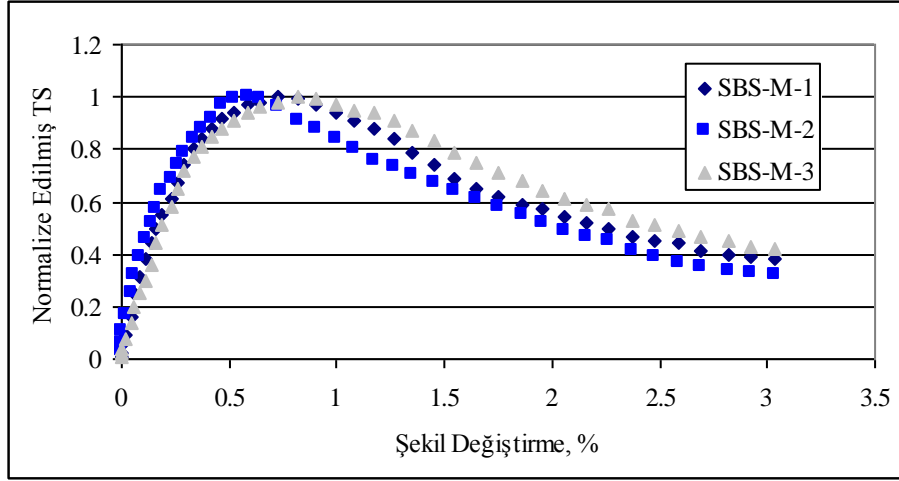
Şekil 5.39. MB<sub>SBS-D</sub> ile hazırlanan karışımların çekme dayanımı - şekil değişirme ilişkisi



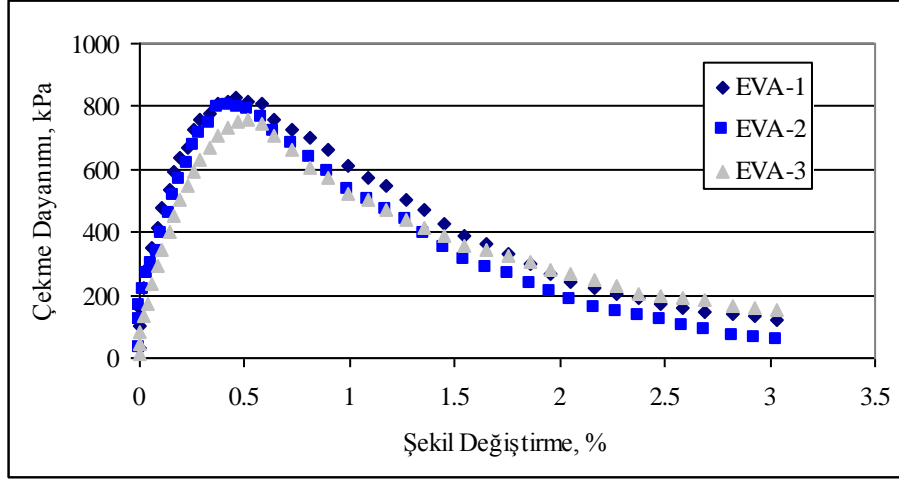
Şekil 5.40. MB<sub>SBS-D</sub> ile hazırlanan karışımların normalize edilmiş TS - şekil değişirme ilişkisi



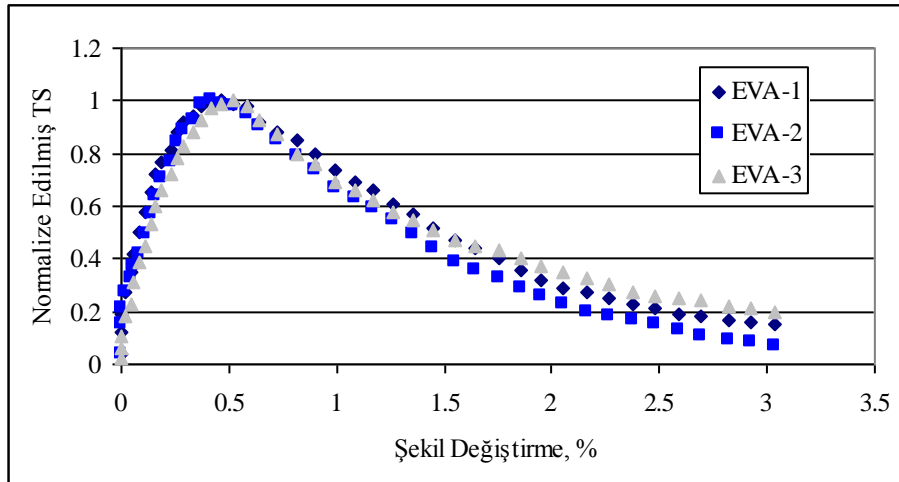
Şekil 5.41. MB<sub>SBS-M</sub> ile hazırlanan karışımların çekme dayanımı - şekil değişirme ilişkisi



Şekil 5.42.  $MB_{SBS-M}$  ile hazırlanan karışımların normalize edilmiş TS - şekil değiştirme ilişkisi

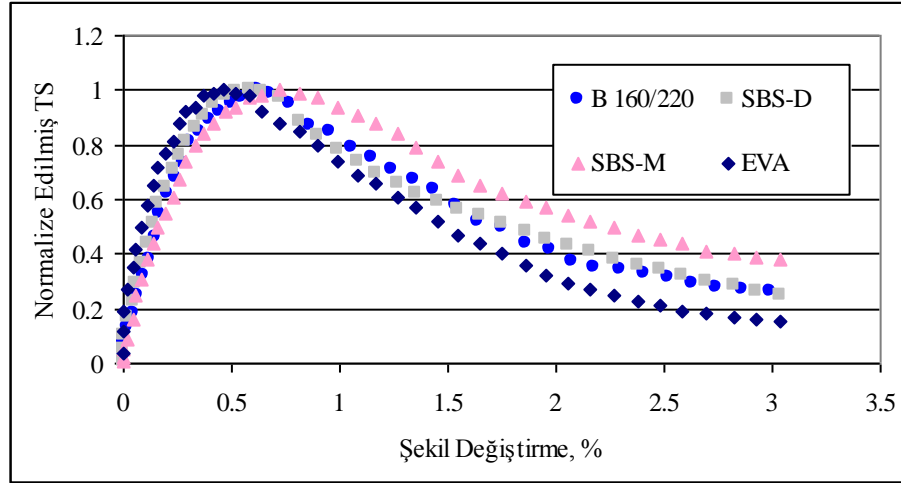


Şekil 5.43.  $MB_{EVA}$  ile hazırlanan karışımların çekme dayanımı - şekil değiştirme ilişkisi



Şekil 5.44.  $MB_{EVA}$  ile hazırlanan karışımların normalize edilmiş TS - şekil değiştirme ilişkisi

Dört farklı bitüm ile hazırlanan karışımların normalize edilmiş TS - şekil değiştirme ilişkisinin birer örneği Şekil 5.45.'te verilmiştir. Bütün karışımlardan elde edilen değerler Tablo 5.39'da verilmiştir.

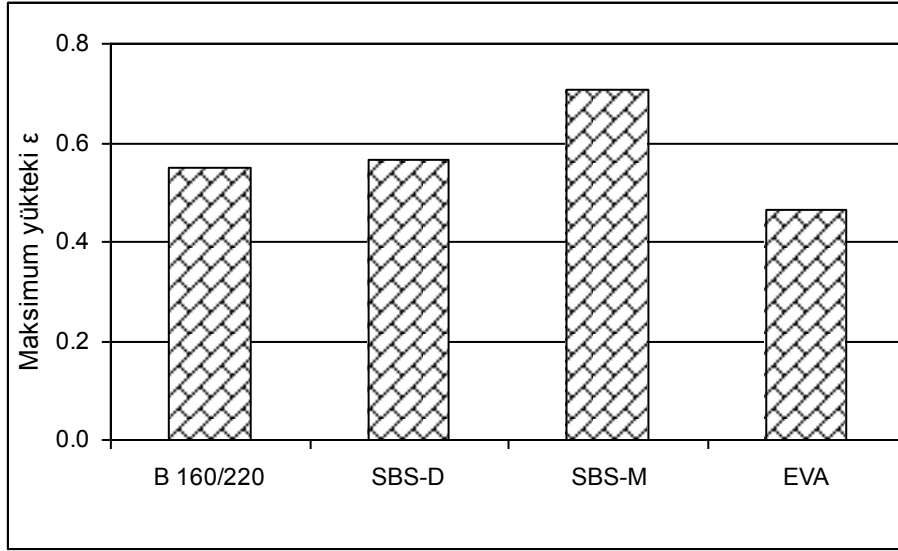


Şekil 5.45. Her karışımın normalize edilmiş TS - şekil değiştirme örneği

Tablo 5.39. Tokluk indeksi deney sonuçları

| Kullanılan Bağlayıcı türü | Numune no | $\epsilon_p$ değerine kadar alan | %3 $\epsilon$ değerine kadar toplam alan | Maksimum yükteki $\epsilon$ | Maksimum $\epsilon$ | Tokluk indeksi (TI) |
|---------------------------|-----------|----------------------------------|--|-----------------------------|---------------------|---------------------|
| B 160/220                 | 1         | 0,42                             | 1,60                                     | 0,48                        | 3,00                | 0,46                |
|                           | 2         | 0,49                             | 1,69                                     | 0,62                        |                     | 0,50                |
|                           | 3         | 0,45                             | 1,71                                     | 0,54                        |                     | 0,50                |
|                           | Ortalama  |                                  |  | <b>0,55</b>                 |                     | <b>0,49</b>         |
| SBS-D                     | 4         | 0,48                             | 1,74                                     | 0,58                        | 3,00                | 0,52                |
|                           | 5         | 0,36                             | 1,58                                     | 0,47                        |                     | 0,48                |
|                           | 6         | 0,53                             | 1,82                                     | 0,64                        |                     | 0,55                |
|                           | Ortalama  |                                  |  | <b>0,56</b>                 |                     | <b>0,52</b>         |
| SBS-M                     | 7         | 0,61                             | 1,99                                     | 0,72                        | 3,00                | 0,61                |
|                           | 8         | 0,47                             | 1,87                                     | 0,58                        |                     | 0,58                |
|                           | 9         | 0,67                             | 2,11                                     | 0,81                        |                     | 0,66                |
|                           | Ortalama  |                                  |  | <b>0,71</b>                 |                     | <b>0,61</b>         |
| EVA                       | 10        | 0,40                             | 1,55                                     | 0,46                        | 3,00                | 0,45                |
|                           | 11        | 0,34                             | 1,37                                     | 0,42                        |                     | 0,40                |
|                           | 12        | 0,43                             | 1,56                                     | 0,52                        |                     | 0,45                |
|                           | Ortalama  |                                  |  | <b>0,47</b>                 |                     | <b>0,44</b>         |

Karışımların maksimum yükteki  $\epsilon$  değerlerinin kullanılan bağlayıcı türü ile değişimi Şekil 5.46'da, tokluk indeksi değerlerinin bağlayıcı türü ile değişimi ise Şekil 5.47'de verilmiştir.

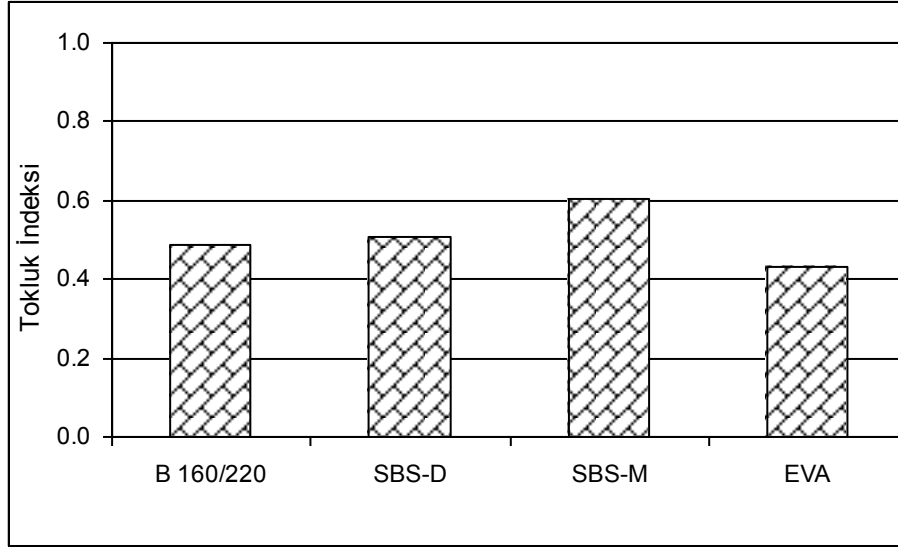


Şekil 5.46. Maksimum yükteki  $\epsilon$  değerlerinin kullanılan bağlayıcı türü ile değişimi

Karışımların maksimum yükteki  $\epsilon$  değerleri incelendiğinde en yüksek değere SBS-M modifiye bitümü ile hazırlanan karışımların en düşük değere ise EVA modifiye bitümü ile hazırlanan karışımların sahip olduğu belirlenmiştir. B 160/220 saf bitümü ve SBS-D modifiye bitümü ile hazırlanan karışımların maksimum yükteki  $\epsilon$  değerlerinin birbirine yakın olduğu tespit edilmiştir. Bu durum maksimum yük değerindeki en fazla yanal deformasyona SBS-M modifiye bağlayıcısı ile hazırlanan karışımın, en düşük yanal deformasyona ise EVA modifiye bağlayıcısı ile hazırlanan karışımın sahip olduğunu göstermektedir.

Şekil 5.47'de görüldüğü üzere en yüksek TI değerine SBS-M modifiye bitümü ile hazırlanan karışımın en düşük değere ise EVA modifiye bitümü ile hazırlanan karışımın sahip olduğu, ayrıca B 160/220 saf bitümü ve SBS-D modifiye bitümü ile hazırlanan karışımın TI değerlerinin birbirine yakın olduğu tespit edilmiştir. B 160/220 saf bitümü, SBS-D modifiyeli bitüm, SBS-M modifiyeli bitüm ile hazırlanan karışımların TI değerlerinin EVA modifiyeli bitüm ile hazırlanan karışımın TI değerine göre sırasıyla %13,8 %18,4 ve %41,1 daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Bu durum karışımlar içerisinde SBS-M modifiye bitümü ile hazırlanan karışımın en fazla elastik davranış sergileyeceğini,

en düşük elastik davranışı ise EVA modifiye bitümü ile hazırlanan karışımın sahip olduğu söylenebilmektedir.

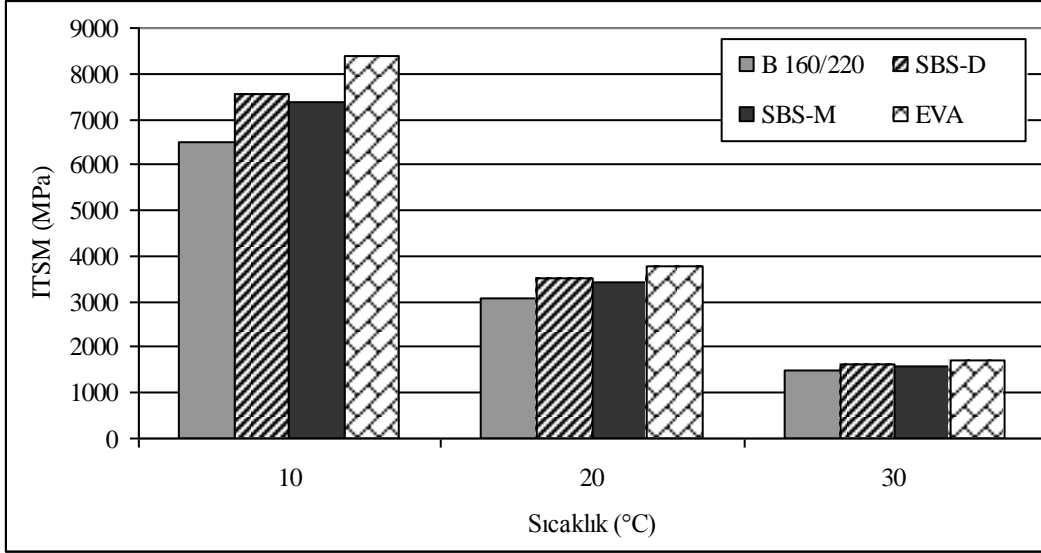


Şekil 5.47. Tokluk indeksi değerlerinin kullanılan bağlayıcı türü ile değişimi

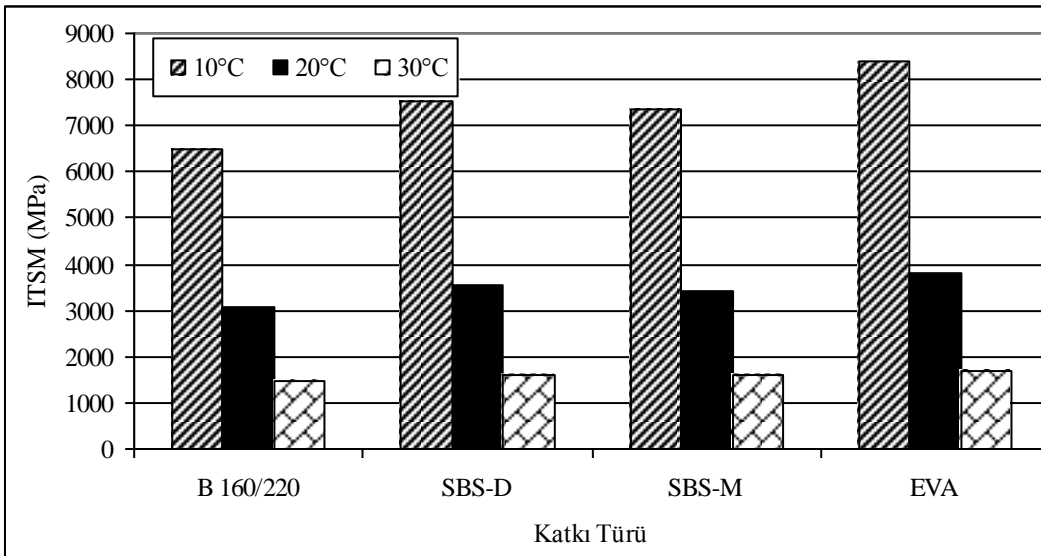
## 5.8. İndirekt Çekme Rijitlik Modülü Deney Sonuçları

Saf ve %4 oranında SBS-D, SBS-M ve EVA polimerleri ile dizayn bitüm içeriklerinde hazırlanan karışımlar üzerinde BS DD 213 standardına uygun olarak indirekt çekme rijitlik modülü (ITSM) deneyi uygulanarak karışımların rijitlikleri belirlenmiştir. ITSM deneyi tahribatsız bir deney olduğundan ITSM deneylerinde kullanılan numuneler Marshall stabilite deneylerinde de kullanılmıştır. Deneylerde her bir karışım türü için üç adet numune denenmiştir. Deneyde 5 adet ön yükleme, ardından 5 defa deney yükleme yapılarak dinamik yükler karşısında bitümlü sıcak karışımların rijitlikleri belirlenmiştir. Deneyde yük periyodu 3000 ms., yük artış süresi ise 124 ms. olarak seçilmiştir. Deformasyon kontrollü bir deney olan ITSM deneyinde hedef deformasyon 5 µm. olarak seçilmiştir. 5 defa tekrarlanan ön yükleme sırasında cihaz otomatik olarak numunede yatay eksende 5 µm. deformasyon meydana getirecek yükü belirlemektedir. Ardından numuneye uygulanan 5 darbe sonucu Formül 4.39 kullanılarak belirlenen ITSM değerlerinin ortalamasından numunenin ITSM değeri belirlenmektedir. Deneyde poisson oranı 0,35 olarak alınmıştır. Ayrıca sıcaklığın ITSM değerleri üzerindeki etkilerini belirlemek amacıyla deneyler 10°C, 20°C ve 30°C sıcaklıklarda yapılmıştır.

Saf ve  $MB_{SBS-D}$ ,  $MB_{SBS-M}$  ve  $MB_{EVA}$  ile dizayn bitüm içeriklerinde hazırlanan karışım numunelerine 10°C, 20°C ve 30°C sıcaklıklarda uygulanan ITSM deneylerinden elde edilen sonuçlar Tablo 5.40'da verilmiştir. Katkı türü ve sıcaklıkla ITSM değerlerinin değişimi Şekil 5.48 ve 5.49'da verilmiştir.



Şekil 5.48. ITSM değerlerinin katkı türü ile değişimi



Şekil 5.49. ITSM değerlerinin sıcaklık ile değişimi

**Tablo 5.40.** Karışımların ITSM deney sonuçları

| Katkı Türü | Numune No | $h_{ort}$ , (mm) | Deneme No | Sıcaklık, (°C) | ITSM, (MPa) | ITSM <sub>ort</sub> , (MPa) | Sıcaklık, (°C) | ITSM, (MPa) | ITSM <sub>ort</sub> , (MPa) | Sıcaklık, (°C) | ITSM, (MPa) | ITSM <sub>ort</sub> , (MPa) |      |    |             |
|------------|-----------|------------------|-----------|----------------|-------------|-----------------------------|----------------|-------------|-----------------------------|----------------|-------------|-----------------------------|------|----|-------------|
| -          | 1         | 66,0             | 1         | 10             | 6346        | 6192                        | 20             | 2948        | 2910                        | 30             | 1370        | 1336                        |      |    |             |
|            |           |                  | 2         |                | 6038        |                             |                | 2871        |                             |                | 1302        |                             |      |    |             |
|            | 2         | 66,2             | 1         |                | 6448        | 6604                        |                | 3245        | 3224                        |                | 1535        | 1579                        |      |    |             |
|            |           |                  | 2         |                | 6760        |                             |                | 3203        |                             |                | 1622        |                             |      |    |             |
|            | 3         | 66,1             | 1         |                | 6684        | 6644                        |                | 3181        | 3139                        |                | 1468        | 1505                        |      |    |             |
|            |           |                  | 2         |                | 6603        |                             |                | 3097        |                             |                | 1541        |                             |      |    |             |
|            | Ortalama  |                  |           |                |             |                             |                | <b>6480</b> |                             |                |             | <b>3091</b>                 |      |    | <b>1473</b> |
|            | SBS-D     | 1                | 68,0      |                | 1           | 10                          |                | 7874        | 7744                        |                | 20          | 3492                        | 3587 | 30 | 1580        |
| 2          |           |                  |           | 7613           | 3681        |                             | 1654           |             |                             |                |             |                             |      |    |             |
| 2          |           | 68,2             | 1         | 7780           | 7817        |                             | 3685           | 3778        | 1656                        | 1641           |             |                             |      |    |             |
|            |           |                  | 2         | 7854           |             |                             | 3870           |             | 1625                        |                |             |                             |      |    |             |
| 3          |           | 68,1             | 1         | 6924           | 7054        |                             | 3122           | 3229        | 1580                        | 1553           |             |                             |      |    |             |
|            |           |                  | 2         | 7184           |             |                             | 3336           |             | 1525                        |                |             |                             |      |    |             |
| Ortalama   |           |                  |           |                |             |                             | <b>7538</b>    |             |                             | <b>3531</b>    |             |                             |      |    | <b>1603</b> |
| SBS-M      |           | 1                | 68,1      | 1              | 10          |                             | 7183           | 7279        | 20                          | 3441           |             | 3386                        | 30   |    | 1595        |
|            | 2         |                  |           | 7374           |             | 3330                        | 1583           |             |                             |                |             |                             |      |    |             |
|            | 2         | 68,2             | 1         | 7766           |             | 7604                        | 3741           | 3655        |                             | 1619           | 1654        |                             |      |    |             |
|            |           |                  | 2         | 7442           |             |                             | 3569           |             |                             | 1689           |             |                             |      |    |             |
|            | 3         | 68,3             | 1         | 7177           |             | 7196                        | 3249           | 3199        |                             | 1554           | 1557        |                             |      |    |             |
|            |           |                  | 2         | 7215           |             |                             | 3148           |             |                             | 1559           |             |                             |      |    |             |
|            | Ortalama  |                  |           |                |             |                             | <b>7360</b>    |             |                             |                | <b>3413</b> |                             |      |    | <b>1600</b> |
|            | EVA       | 1                | 67,9      | 1              |             | 10                          | 8312           | 8325        |                             | 20             | 3850        | 3779                        |      | 30 | 1650        |
| 2          |           |                  |           | 8338           | 3707        |                             | 1714           |             |                             |                |             |                             |      |    |             |
| 2          |           | 67,7             | 1         | 8619           | 8576        |                             | 3982           | 3942        | 1816                        |                | 1780        |                             |      |    |             |
|            |           |                  | 2         | 8532           |             |                             | 3902           |             | 1744                        |                |             |                             |      |    |             |
| 3          |           | 67,0             | 1         | 8170           | 8291        |                             | 3686           | 3667        | 1555                        |                | 1618        |                             |      |    |             |
|            |           |                  | 2         | 8411           |             |                             | 3647           |             | 1681                        |                |             |                             |      |    |             |
| Ortalama   |           |                  |           |                |             |                             | <b>8397</b>    |             |                             |                | <b>3796</b> |                             |      |    | <b>1693</b> |



Şekil 5.48 ve 5.49’da görüldüğü üzere bütün sıcaklıklarda polimer kullanımı ile ITSM değerleri artarken sıcaklığın etkisiyle bu değerler azalmıştır. Bütün sıcaklıklarda en yüksek ITSM değerine EVA katkı maddesi içeren modifiye bitümlerle hazırlanan karışımların sahip olduğu, en düşük değere ise B 160/220 bitümü ile hazırlanan karışımın sahip olduğu belirlenmiştir. 10, 20 ve 30°C sıcaklıkta SBS-D modifiye bitümü kullanılması ile karışımların ITSM değeri saf karışıma göre sırasıyla %16,3 %14,2 ve %8,9 oranlarında artmıştır. SBS-M içeren modifiye bitüm ile hazırlanan karışımların ITSM değeri 10, 20 ve 30°C sıcaklıkta kontrol karışımına göre %13,6 %10,4 ve %8,6 oranlarında artmıştır. 10, 20 ve 30°C sıcaklıkta EVA modifiye bitümü kullanılması ile karışımların ITSM değeri saf karışıma göre sırasıyla %29,6 %22,8 ve %15,0 oranlarında artmıştır. Bu surum sıcaklığın artması ile karışımların etkinliğinin azaldığını, ITSM değerlerinin birbirine yaklaştığını göstermektedir. Sıcaklığın 30°C sıcaklıktan 10°C sıcaklığa düşmesiyle B 160/220 saf bitümü, SBS-D, SBS-M ve EVA modifiye bitümleri ile hazırlanan karışımların ITSM değeri sırasıyla 4.4, 4.7, 4.6 ve 5.0 kat artmıştır. Bu durum, sıcaklığın azalması ile rijitlikteki en fazla artışın EVA modifiye bitümü ile hazırlanan karışımlarda, en az artışın ise B 160/220 saf bitümü ile hazırlanan karışımlarda olacağını göstermektedir.

### **5.9. İndirekt Çekme Yorulma Deney Sonuçları**

İndirekt çekme yorulma deneyi, B 160/220 saf bitümü ile hazırlanan karışım, %4 SBS-D, SBS-M ve EVA içeren modifiye bitümler kullanılarak hazırlanan karışım numuneleri üzerinde uygulanmıştır. Gerilme kontrollü olarak yapılan deneyde 300 kPa, 350 kPa ve 400 kPa olmak üzere üç farklı gerilme seviyesi uygulanmıştır.

Deney, 25°C sıcaklıkta yapılmıştır. Deneye başlamadan önce numuneler 3 saat deney sıcaklığında bekletilmiştir. Bu süre sonunda numune, yükleme başlıkları arasına yerleştirilmiş, düşey deformasyonu okuyacak LVDT’ler ayarlanmış, numune yüksekliği, çapı, gerilme seviyesi değerleri ve yükleme periyodu bilgisayara girilmiş ve deneye başlanmıştır. Yükleme periyodu 1,5 sn olarak alınmış bu sürenin 0,124 saniyesi ITSM deneyinde olduğu gibi yük etki süresi olarak ayarlanmıştır. Böylece dinlenme periyodu (rest period) 1,376 saniye olmuştur. Deney, numuneler tam olarak kırılıncaya kadar devam etmiştir. Numunelerin bir kısmının deneyden sonraki durumları Şekil 5.50’de görülmektedir.



Şekil 5.50. Yorulma deneyi sonrasında numunelerin görünüşü

İndirekt çekme yorulma deneylerinde numunelerde kırılma meydana gelinceye kadar tekrarlı yük uygulanmaya devam edilerek maksimum yük tekerrür sayısı ( $N_{mak}$ ) ve maksimum yük tekerrür sayısındaki deformasyon miktarları ( $\delta_{mak}$ ) belirlenmiştir. Yük-deformasyon eğrisinde II. ve III. kısımların teğetlerinin kesişimlerinden yorulma ömürleri belirlenmiştir. III. Kısımda teğet, eğrinin dönüş yaptığı noktadan itibaren alınmıştır. Excel formatında eğrinin II. ve III. kısımları iki ayrı kısma ayrılarak belirlenen yerlerden geçirilen teğetlerin formülleri belirlenmiştir. İki teğet birbirine eşitlenerek karışımların yorulma ömürleri ( $N_f$ ) tespit edilmiştir. Eğride deformasyon oranının arttığı nokta (II. ve III. bölge sınırı) çatlak başlaması için gerekli yük tekerrür sayısı ( $N_i$ ) olarak elde edilmiştir. Çatlak başlangıcı yük tekrar sayısının belirlenmesi için eğim-yük tekrar sayısı grafiği çizilmiş eğimin artmaya başladığı nokta çatlak başlangıcı yük tekrar sayısı ( $N_i$ ) olarak alınmıştır. Yorulma ömrü ( $N_f$ ) ile çatlak başlangıcı yük tekerrür sayısı ( $N_i$ ) arasındaki farktan çatlak ilerlemesi yük tekerrür sayısı ( $N_p$ ) değerleri elde edilmiştir. Formül 4.41 kullanılarak III. Bölgede,  $N_i$  ile  $N_{mak}$  arasında ayrıca  $N_f$  ile  $N_{mak}$  arasında her 1 mm deformasyon oluşabilmesi için gerekli yük tekrar sayıları ( $r_p$  ve  $r_f$ ) belirlenmiştir. Kısa dönem yaşlandırılmış numunelere 300, 350 ve 400 kPa gerilme seviyelerinde uygulanan indirekt çekme yorulma deneylerinden elde edilen  $N_i$ ,  $N_f$ ,  $N_p$ ,  $N_{mak}$ ,  $\delta_i$ ,  $\delta_f$ ,  $\delta_{mak}$ ,  $r_p$  ve  $r_f$  değerleri Tablo 5.41–5.43’de verilmiştir. Ayrıca 300, 350 ve 400 kPa gerilme seviyesinde uygulanan deneylerden elde edilen deformasyon–yük tekerrür sayısı ilişkisine birer örnek Şekil 5.51–5.53’te çizilmiştir.

**Tablo 5.41.** Karışımların 300 kPa gerilme seviyesinde indirekt çekme yorulma deney sonuçları

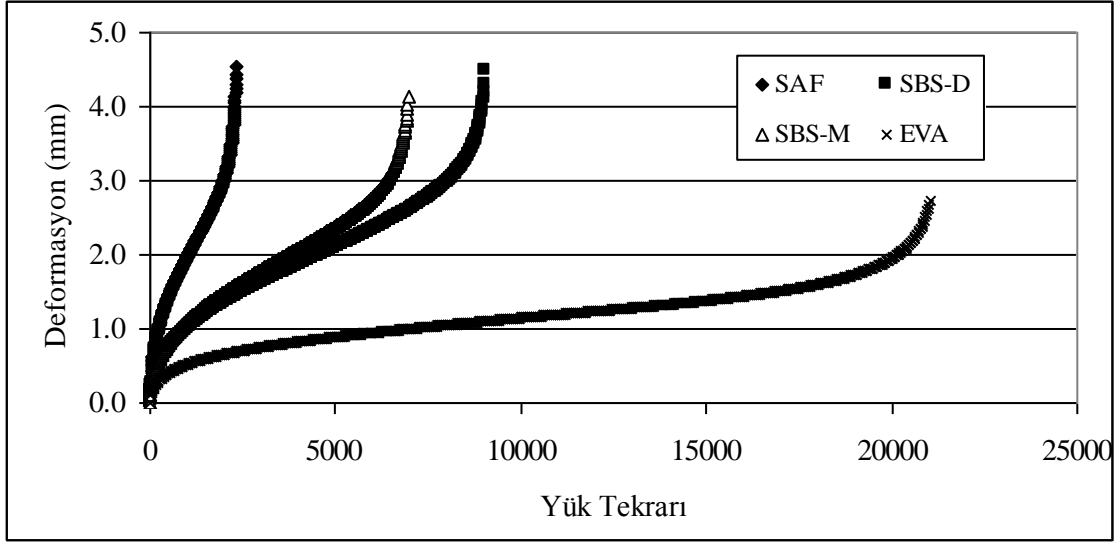
| Katkı Türü | Num. No | $\sigma$ (kPa) | II. Kısım Teğet Denklemi | III. Kısım Teğet Denklemi | $N_i$        | $\delta_i$   | $N_f$        | $\delta_f$   | $N_p$       | $N_{mak}$    | $\delta_{mak}$ | $r_p$       | $r_f$       |
|------------|---------|----------------|--------------------------|---------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-------------|--------------|----------------|-------------|-------------|
| -          | 1       | 300            | $y = 0,0008x + 1.045$    | $y = 0,0056x - 11.207$    | 2208         | 2,7522       | 2553         | 3,2857       | 345         | 2732         | 4,43           | 647         | 156         |
|            | 2       |                | $y = 0,001x + 0.3146$    | $y = 0,0081x - 16,323$    | 1869         | 2,1032       | 2343         | 2,9859       | 474         | 2499         | 4,375          | 537         | 112         |
|            | 3       |                | $y = 0,001x + 1.0232$    | $y = 0,0076x - 13.333$    | 1944         | 2,9524       | 2175         | 3,4474       | 231         | 2320         | 4,54           | 467         | 133         |
|            | Ort.    |                |                          |                           | <b>2007</b>  | <b>2,603</b> | <b>2357</b>  | <b>3,240</b> | <b>350</b>  | <b>2517</b>  | <b>4,448</b>   | <b>550</b>  | <b>134</b>  |
| SBS-D      | 1       | 300            | $y = 0,0002x + 0.9207$   | $y = 0,0034 - 26.764$     | 7512         | 2,774        | 8652         | 3,384        | 1140        | 9048         | 4,486          | 1869        | 359         |
|            | 2       |                | $y = 0,0002x + 1.0358$   | $y = 0,0016x - 14.578$    | 9792         | 3,028        | 11153        | 3,654        | 1361        | 11652        | 4,306          | 2174        | 765         |
|            | 3       |                | $y = 0,0003x + 0,8356$   | $y = 0,0037x - 22.354$    | 5652         | 2,58         | 6820         | 3,362        | 1168        | 7152         | 4,133          | 1494        | 431         |
|            | Ort.    |                |                          |                           | <b>7652</b>  | <b>2,794</b> | <b>8875</b>  | <b>3,467</b> | <b>1223</b> | <b>9284</b>  | <b>4,308</b>   | <b>1846</b> | <b>518</b>  |
| SBS-M      | 1       | 300            | $y = 0.0002x + 0.95$     | $y = 0.0023x - 15.427$    | 6900         | 2,596        | 7799         | 3,11         | 899         | 8196         | 4,027          | 1749        | 433         |
|            | 2       |                | $y = 0.0003x + 0.8045$   | $y = 0,0032x - 16.085$    | 5148         | 2,461        | 5824         | 2,906        | 676         | 6120         | 3,654          | 1519        | 396         |
|            | 3       |                | $y = 0.0003x + 0.9263$   | $y = 0.003x - 16.967$     | 5820         | 2,68         | 6627         | 3,144        | 807         | 6960         | 4,127          | 1739        | 339         |
|            | Ort.    |                |                          |                           | <b>5956</b>  | <b>2,579</b> | <b>6750</b>  | <b>3,053</b> | <b>794</b>  | <b>7092</b>  | <b>3,936</b>   | <b>1669</b> | <b>389</b>  |
| EVA        | 1       | 300            | $y = 5E-05x + 0.6548$    | $y = 0,0016x - 29.178$    | 15744        | 1,4459       | 18402        | 1,855        | 2658        | 19320        | 2,545          | 6497        | 1330        |
|            | 2       |                | $y = 5E-05x + 0,6885$    | $y = 0,0009x - 16.066$    | 17112        | 1,522        | 19711        | 1,873        | 2599        | 21024        | 2,74           | 7405        | 1514        |
|            | 3       |                | $y = 4E-05x + 0.5553$    | $y = 0,0004x - 6.482$     | 16344        | 1,309        | 19890        | 1,764        | 3546        | 20784        | 2,118          | 7793        | 2525        |
|            | Ort.    |                |                          |                           | <b>16400</b> | <b>1,426</b> | <b>19334</b> | <b>1,831</b> | <b>2934</b> | <b>20376</b> | <b>2,468</b>   | <b>7232</b> | <b>1790</b> |

**Tablo 5.42.** Karışımların 350 kPa gerilme seviyesinde indirekt çekme yorulma deney sonuçları

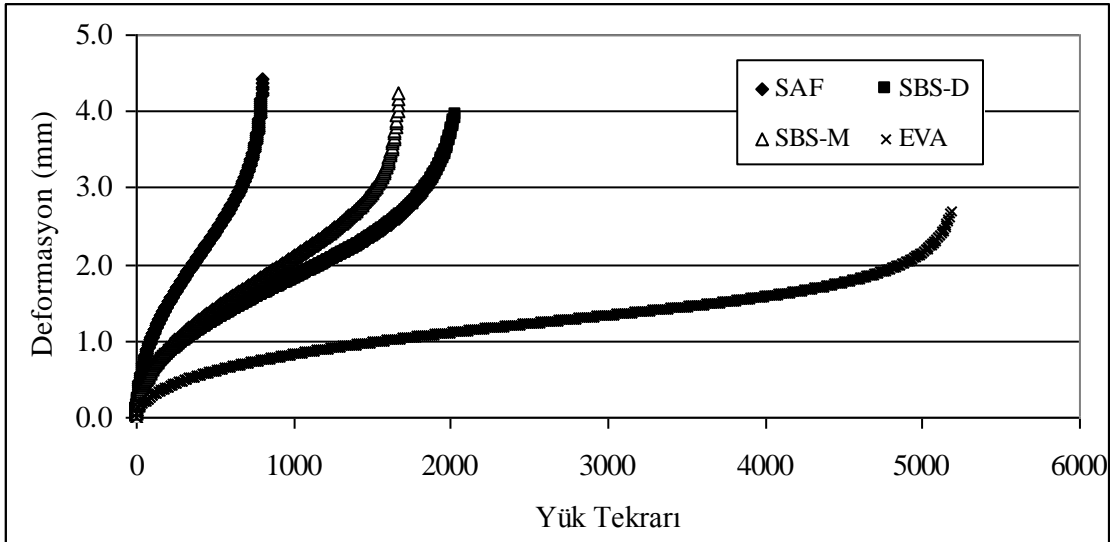
| Katkı Türü | Num. No | $\sigma$ (kPa) | II. Kısım Teğet Denklemi | III. Kısım Teğet Denklemi | $N_i$        | $\delta_i$  | $N_f$        | $\delta_f$ | $N_p$       | $N_{mak}$    | $\delta_{mak}$ | $r_p$      | $r_f$ |
|------------|---------|----------------|--------------------------|---------------------------|--------------|-------------|--------------|------------|-------------|--------------|----------------|------------|-------|
| -          | 1       | 350            | $y = 0,0031x + 0,8834$   | $y = 0,0288x - 18,704$    | 663          | 2,9964      | 762          | 3,643      | 99          | 802          | 4,432          | 153        | 51    |
|            | 2       |                | $y = 0,0028x + 1,1752$   | $y = 0,0226x - 15,749$    | 780          | 3,4416      | 855          | 3,874      | 75          | 899          | 4,597          | 173        | 61    |
|            | 3       |                | $y = 0,0035x + 0,8263$   | $y = 0,0485x - 29,361$    | 576          | 2,9249      | 671          | 3,668      | 95          | 701          | 4,673          | 128        | 30    |
|            | Ort.    |                |                          | <b>673</b>                | <b>3,121</b> | <b>763</b>  | <b>3,728</b> | <b>90</b>  | <b>801</b>  | <b>4,567</b> | <b>151</b>     | <b>47</b>  |       |
| SBS-D      | 1       | 350            | $y = 0,0011x + 0,7486$   | $y = 0,0059x - 8,2347$    | 1602         | 2,496       | 1872         | 3,067      | 270         | 2031         | 3,95           | 473        | 180   |
|            | 2       |                | $y = 0,001x + 0,7243$    | $y = 0,0086x - 13,534$    | 1656         | 2,497       | 1876         | 2,941      | 220         | 2004         | 3,693          | 495        | 170   |
|            | 3       |                | $y = 0,0007x + 0,6711$   | $y = 0,007x - 13,737$     | 1968         | 2,012       | 2287         | 2,514      | 319         | 2400         | 3,403          | 635        | 127   |
|            | Ort.    |                |                          | <b>1742</b>               | <b>2,335</b> | <b>2012</b> | <b>2,841</b> | <b>270</b> | <b>2145</b> | <b>3,682</b> | <b>535</b>     | <b>159</b> |       |
| SBS-M      | 1       | 350            | $y = 0,0014x + 0,7421$   | $y = 0,0177x - 25,367$    | 1368         | 2,659       | 1602         | 3,361      | 234         | 1668         | 4,248          | 333        | 74    |
|            | 2       |                | $y = 0,0024x + 0,607$    | $y = 0,0172x - 14,731$    | 834          | 2,639       | 1036         | 3,493      | 202         | 1122         | 4,529          | 237        | 83    |
|            | 3       |                | $y = 0,0014x + 0,6553$   | $y = 0,0124x - 12,454$    | 1050         | 2,158       | 1192         | 2,598      | 142         | 1269         | 4,407          | 323        | 43    |
|            | Ort.    |                |                          | <b>1084</b>               | <b>2,485</b> | <b>1277</b> | <b>3,151</b> | <b>193</b> | <b>1353</b> | <b>4,395</b> | <b>298</b>     | <b>67</b>  |       |
| EVA        | 1       | 350            | $y = 0,0002x + 0,5129$   | $y = 0,0054x - 19,075$    | 3132         | 1,318       | 3767         | 1,794      | 635         | 3966         | 2,891          | 1334       | 181   |
|            | 2       |                | $y = 0,0002x + 0,5087$   | $y = 0,0018x - 7,4701$    | 3720         | 1,231       | 4987         | 1,731      | 1267        | 5316         | 2,197          | 2534       | 706   |
|            | 3       |                | $y = 0,0002x + 0,6672$   | $y = 0,004x - 18,052$     | 4338         | 1,7         | 4926         | 2,068      | 588         | 5184         | 2,705          | 1598       | 405   |
|            | Ort.    |                |                          | <b>3730</b>               | <b>1,416</b> | <b>4560</b> | <b>1,864</b> | <b>830</b> | <b>4822</b> | <b>2,598</b> | <b>1822</b>    | <b>431</b> |       |

**Tablo 5.43.** Karışımların 400 kPa gerilme seviyesinde indirekt çekme yorulma deney sonuçları

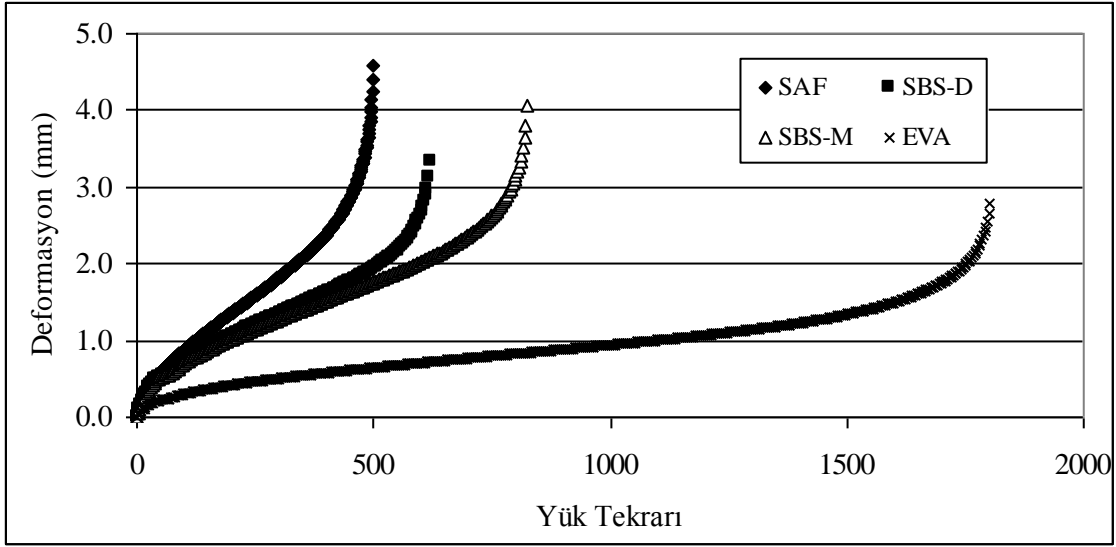
| Katkı Türü | Num. No | $\sigma$ (kPa) | II. Kısım Teğet Denklemi | III. Kısım Teğet Denklemi | $N_i$       | $\delta_i$   | $N_f$       | $\delta_f$   | $N_p$      | $N_{mak}$   | $\delta_{mak}$ | $r_p$      | $r_f$     |
|------------|---------|----------------|--------------------------|---------------------------|-------------|--------------|-------------|--------------|------------|-------------|----------------|------------|-----------|
| -          | 1       | 400            | $y = 0,0048x + 0,3943$   | $y = 0,0448x - 18,247$    | 372         | 2,205        | 466         | 3,088        | 94         | 500         | 4,593          | 106        | 23        |
|            | 2       |                | $y = 0,0069x + 0,9055$   | $y = 0,0523x - 14,408$    | 297         | 3,018        | 337         | 3,565        | 40         | 359         | 4,503          | 73         | 23        |
|            | 3       |                | $y = 0,0056x + 0,8734$   | $y = 0,0513x - 18,558$    | 372         | 3,029        | 425         | 3,63         | 53         | 446         | 4,325          | 88         | 30        |
|            | Ort.    |                |                          |                           | <b>347</b>  | <b>2,751</b> | <b>409</b>  | <b>3,428</b> | <b>62</b>  | <b>435</b>  | <b>4,474</b>   | <b>89</b>  | <b>25</b> |
| SBS-D      | 1       | 400            | $y = 0,003x + 0,5928$    | $y = 0,025x - 11,075$     | 465         | 2,019        | 530         | 2,41         | 65         | 561         | 3,002          | 166        | 52        |
|            | 2       |                | $y = 0,0026x + 0,414$    | $y = 0,0411x - 20,668$    | 444         | 1,617        | 548         | 2,243        | 104        | 576         | 3,187          | 166        | 30        |
|            | 3       |                | $y = 0,0029x + 0,4619$   | $y = 0,027x - 13,633$     | 495         | 1,912        | 585         | 2,434        | 90         | 621         | 3,333          | 172        | 40        |
|            | Ort.    |                |                          |                           | <b>468</b>  | <b>1,849</b> | <b>554</b>  | <b>2,362</b> | <b>86</b>  | <b>586</b>  | <b>3,174</b>   | <b>168</b> | <b>41</b> |
| SBS-M      | 1       | 400            | $y = 0,0026x + 0,6282$   | $y = 0,0203x - 10,759$    | 561         | 2,144        | 643         | 2,558        | 82         | 687         | 3,255          | 198        | 63        |
|            | 2       |                | $y = 0,0025x + 0,535$    | $y = 0,0223x - 14,759$    | 639         | 2,139        | 772         | 2,791        | 133        | 825         | 4,068          | 204        | 42        |
|            | 3       |                | $y = 0,002x + 0,5389$    | $y = 0,0253x - 19,355$    | 705         | 1,987        | 854         | 2,661        | 149        | 900         | 3,76           | 221        | 42        |
|            | Ort.    |                |                          |                           | <b>635</b>  | <b>2,090</b> | <b>756</b>  | <b>2,670</b> | <b>121</b> | <b>804</b>  | <b>3,694</b>   | <b>208</b> | <b>49</b> |
| EVA        | 1       | 400            | $y = 0,0007x + 0,5766$   | $y = 0,0131x - 16,551$    | 1197        | 1,443        | 1381        | 1,858        | 184        | 1453        | 2,517          | 443        | 109       |
|            | 2       |                | $y = 0,0007x + 0,4596$   | $y = 0,0139x - 19,947$    | 1296        | 1,428        | 1546        | 1,891        | 250        | 1619        | 2,897          | 540        | 73        |
|            | 3       |                | $y = 0,0006x + 0,3353$   | $y = 0,0137x - 22,121$    | 1347        | 1,183        | 1714        | 1,81         | 367        | 1803        | 2,788          | 585        | 91        |
|            | Ort.    |                |                          |                           | <b>1280</b> | <b>1,351</b> | <b>1547</b> | <b>1,853</b> | <b>267</b> | <b>1625</b> | <b>2,734</b>   | <b>523</b> | <b>91</b> |



Şekil 5.51. Karışımların 300 kPa gerilme seviyesinde deformasyon-yük tekrar sayısı ilişkisi

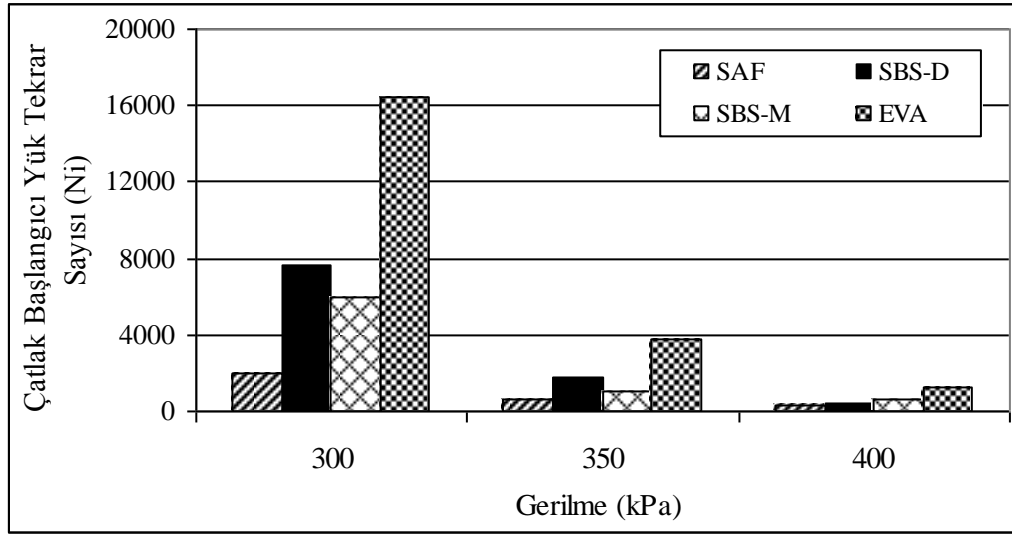


Şekil 5.52. Karışımların 350 kPa gerilme seviyesinde deformasyon-yük tekrar sayısı ilişkisi



Şekil 5.53. Karışımların 400 kPa gerilme seviyesinde deformasyon-yük tekrar sayısı ilişkisi

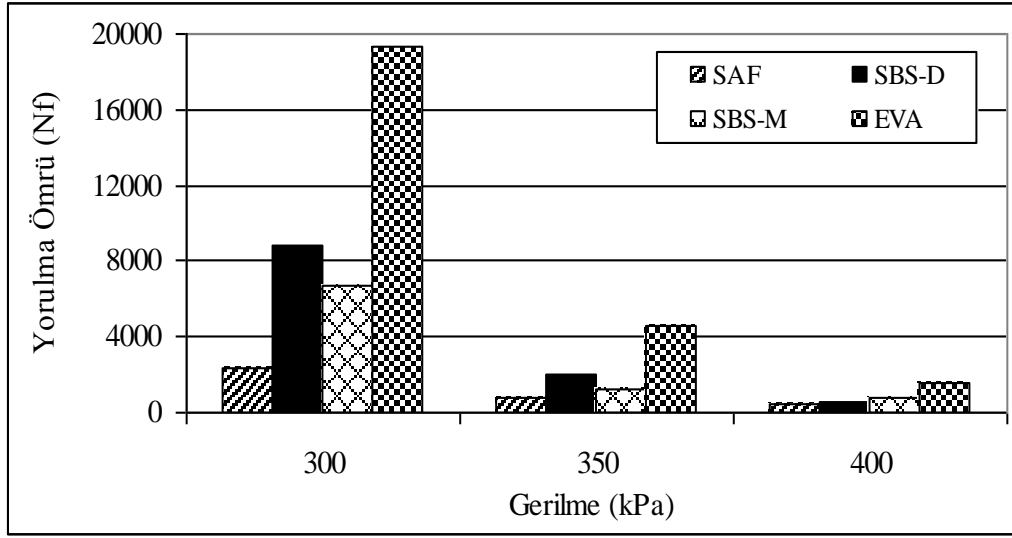
Şekil 5.51-5.53'te görüldüğü üzere numunelerde kırılma meydana gelmesi için en düşük gerekli yük tekrar sayısına B 160/220 saf karışımı ile hazırlanan karışımların, en yüksek yük tekrar sayısına ise %4 EVA modifiye bitümü ile hazırlanan karışımların sahip olduğu belirlenmiştir. 300 ve 350 kPa gerilme seviyelerinde %4 SBS-D ve SBS-M modifiye bitümleri ile hazırlanan karışımların yük tekrarı – deformasyon ilişkilerinin benzer olduğu, 400 kPa gerilme seviyesinde ise B 160/220 saf bitümü, %4 SBS-D ve SBS-M modifiye bitümleri ile hazırlanan karışımların yük tekrarı – deformasyon ilişkilerinin benzer olduğu tespit edilmiştir. Bütün gerilme seviyelerinde %4 oranında EVA içeren modifiye bağlayıcı ile hazırlanan karışımın yorulma ömürlerinin diğer karışımlara göre önemli oranda yüksek olduğu belirlenmiştir. Deformasyonlar incelendiğinde her üç gerilme seviyesinde en yüksek deformasyon değerlerine saf karışımın, en düşük deformasyon değerine ise %4 oranında EVA içeren modifiye bağlayıcı ile hazırlanan karışımın sahip olduğu belirlenmiştir. Bu durum, EVA kullanımı ile numunelerin dayanabileceği yük tekrar sayısının artmasına rağmen bitümlü sıcak karışımların esnekliğinin azaldığını ve bunun sonucunda daha gevrek bir kırılmanın olduğunu göstermektedir. 300, 350 ve 400 kPa gerilme seviyelerinde üç numuneden elde edilen çatlağın oluştuğu yük tekrar sayılarının ( $N_i$ ) ortalamasının asfaltit içeriği ile değişimi Şekil 5.54'te, yorulma ömrü ( $N_f$ ) değerlerinin ortalamasının asfaltit içeriği ile değişimi Şekil 5.55'te, çatlak ilerlemesi için gerekli yük tekrar sayısı ( $N_p$ ) değerlerinin ortalamasının asfaltit içeriği ile değişimi Şekil 5.56'da, maksimum yük tekrar sayılarının ( $N_{mak}$ ) ortalamasının asfaltit içeriği ile değişimi Şekil 5.57'de verilmiştir.



Şekil 5.54. Çatlak başlangıcı yük tekrar sayısı ( $N_i$ ) – katkı türü ilişkisi

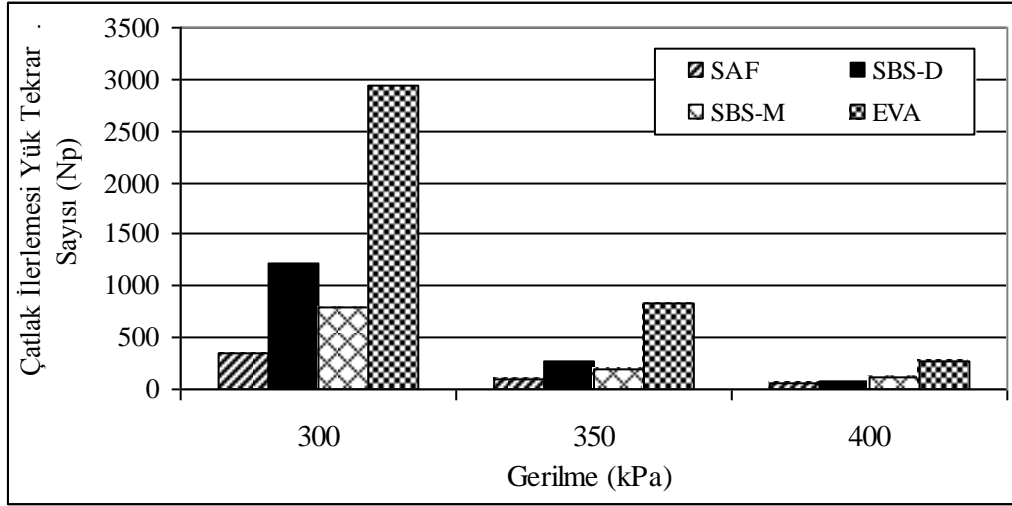
Şekil 5.54 incelendiğinde bütün gerilme seviyelerinde katkı kullanımı ile çatlak başlangıcı yük tekrar sayılarının ( $N_i$ ) arttığı belirlenmiştir. Ayrıca gerilme seviyeleri arttıkça bütün karışımların  $N_i$  değerleri azalmıştır. 300 kPa gerilme seviyesinde %4 oranında SBS-D kullanılması durumunda  $N_i$  değeri saf karışıma göre 3,81 kat, SBS-M kullanılması durumunda 2,97 kat ve EVA kullanılması durumunda 8,17 kat artmıştır. 350 kPa gerilme seviyesinde %4 oranında SBS-D kullanılması durumunda  $N_i$  değeri saf karışıma göre 2,59 kat, SBS-M kullanılması durumunda 1,61 kat ve EVA kullanılması durumunda 5,54 kat artmıştır. 400 kPa gerilme seviyesinde ve %4 oranında SBS-D, SBS-M ve EVA kullanılması durumunda  $N_i$  değeri saf karışıma göre sırasıyla 1,35 kat, 1,83 kat ve 3,69 kat artmıştır. Bu durum düşük gerilme seviyelerinde (300 kPa) çatlak başlangıcı yük tekrar sayıları açısından bütün katkıların daha etkin olduğunu göstermektedir. Katkı türleri içerisinde en etkin katkı türünün EVA olduğu, etkinliği en az olanın ise 300 ve 350 kPa gerilme seviyesinde SBS-M, 400 kPa gerilme seviyesinde ise SBS-D olduğu belirlenmiştir.





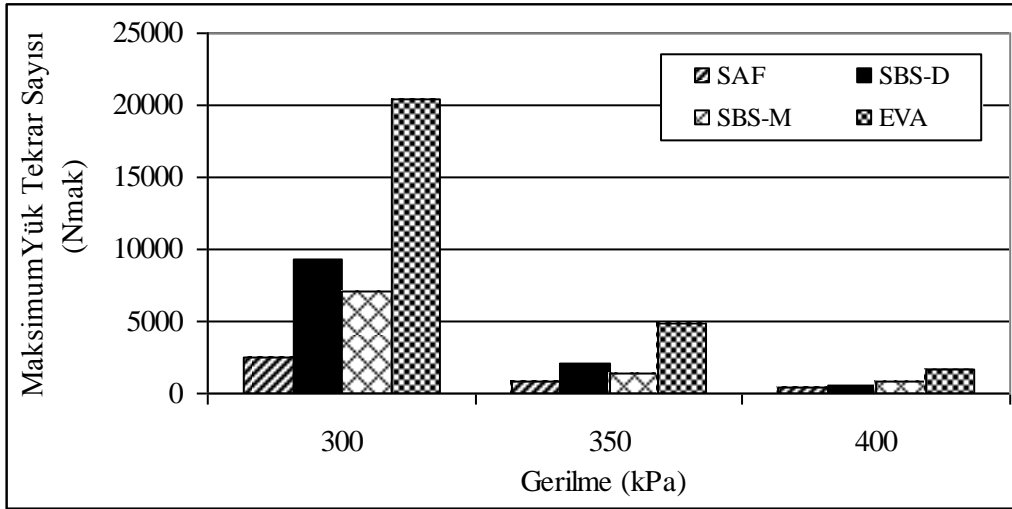
Şekil 5.55. Yorulma ömrü ( $N_f$ ) - katkı türü ilişkisi

Yük tekrar sayısı - deformasyon grafiğinde II. ve III. kısımların teğetlerinin kesim noktalarından elde edilen yorulma ömrü değerlerine göre çizilen grafiklerden, çatlak başlangıcı yük tekrar sayılarında olduğu gibi katkı kullanımı ile yorulma ömrü ( $N_f$ ) değerlerinin arttığı, gerilme seviyesi arttıkça ise  $N_f$  değerlerinin azaldığı belirlenmiştir. 300 kPa gerilme seviyesinde %4 oranında SBS-D kullanılan karışımın  $N_f$  değerinin saf karışıma göre 3,77 kat, SBS-M kullanılan karışımın 2,86 kat ve EVA kullanılan karışımın 8,20 kat yüksek olduğu belirlenmiştir. 350 kPa gerilme seviyesinde %4 oranında SBS-D, SBS-M ve EVA kullanılan karışımların  $N_f$  değerlerinin saf karışımın  $N_f$  değerine göre sırasıyla 2,64 kat, 1,67 kat ve 5,98 kat daha yüksek olduğu belirlenmiştir. 400 kPa gerilme seviyesinde %4 oranında SBS-D kullanılan karışımın  $N_f$  değerinin saf karışıma göre 1,35 kat, SBS-M kullanılan karışımın 1,85 kat ve EVA kullanılan karışımın 3,78 kat yüksek olduğu belirlenmiştir.  $N_i$  değerlerinde olduğu gibi  $N_f$  değerlerinde de en etkin katkı türünün EVA olduğu, etkinliği en az olan katkı türünün ise 300 ve 350 kPa gerilme seviyesinde SBS-M, 400 kPa gerilme seviyesinde ise SBS-D olduğu belirlenmiştir.



Şekil 5.56. Çatlak ilerlemesi yük tekrar sayısı (N<sub>p</sub>) - katkı türü ilişkisi

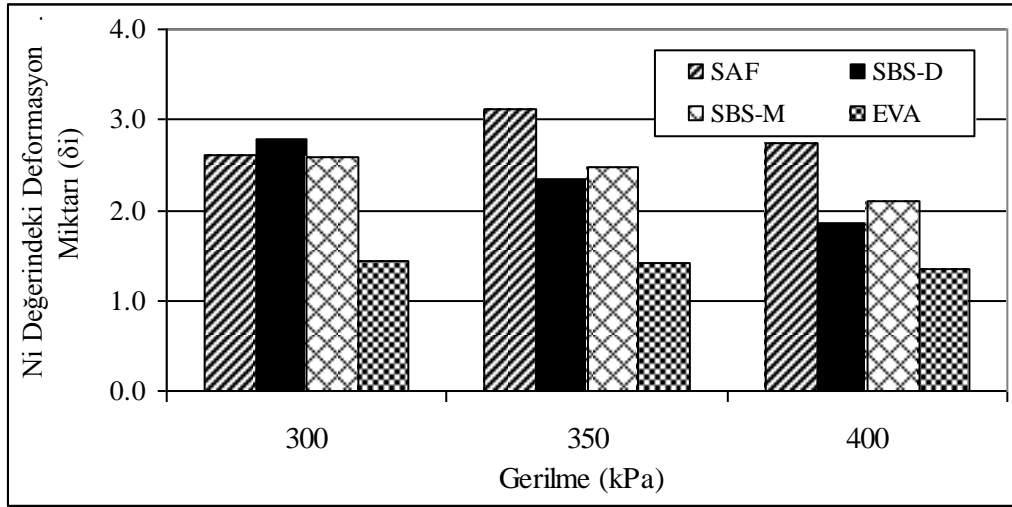
Şekil 5.56’da görülen çatlak ilerlemesi yük tekrar sayısı değerleri, N<sub>f</sub> ile N<sub>i</sub> değerlerinin farkından elde edilmiştir. Çatlak ilerlemesi yük tekrar sayıları (N<sub>p</sub>) değerleri incelendiğinde ise N<sub>f</sub> ve N<sub>i</sub> değerlerinin asfaltit içeriği ve gerilme ile değişimine benzer bir ilişki görülebilmektedir.



Şekil 5.57. Maksimum yük tekrar sayısı - katkı türü ilişkisi

Şekil 5.57’de görüldüğü üzere, bütün gerilme seviyelerinde katkı kullanımı ile maksimum yük tekrar sayıları artmıştır. Özellikle 300 kPa gerilme seviyesinde katkı türlerinin etkisi ön plana çıkmıştır. 300 kPa gerilme seviyesinde %4 oranında SBS-D kullanılması durumunda N<sub>mak</sub> değeri saf karışıma göre 3,69 kat, SBS-M kullanılması durumunda 2,82 kat ve EVA kullanılması durumunda 8,10 kat artmıştır. 350 kPa gerilme

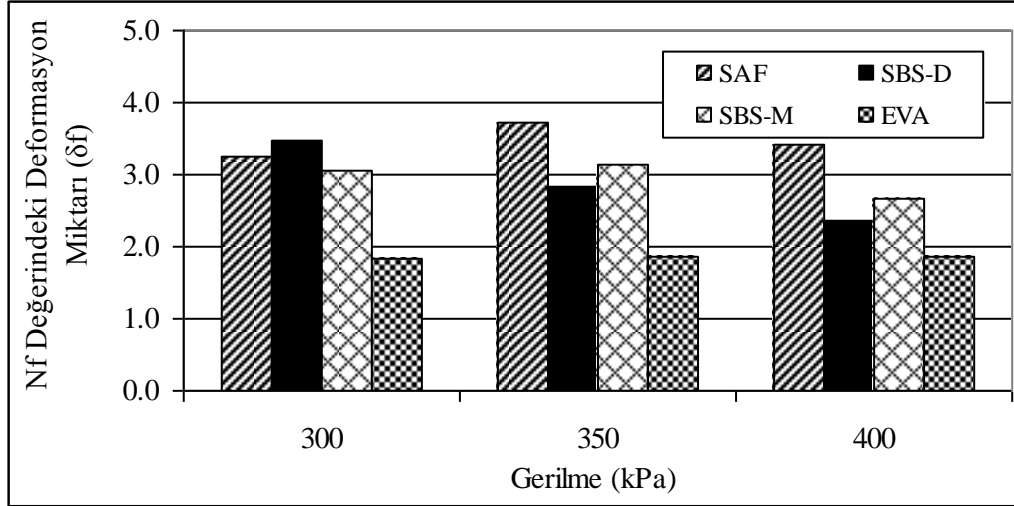
seviyesinde %4 oranında SBS-D kullanılması durumunda  $N_{mak}$  değeri saf karışıma göre 2,68 kat, SBS-M kullanılması durumunda 1,69 kat ve EVA kullanılması durumunda 6,02 kat artmıştır. 400 kPa gerilme seviyesinde %4 oranında SBS-D, SBS-M ve EVA kullanılması durumunda  $N_{mak}$  değeri saf karışıma göre sırasıyla 1,35 kat, 1,85 kat ve 3,74 kat artmıştır. Bu durum düşük gerilme seviyelerinde (300 kPa) maksimum yük tekrar sayıları açısından bütün katkıların daha etkin olduğunu göstermektedir.  $N_i$ ,  $N_f$ ,  $N_p$  ve  $N_{mak}$  grafiklerinde ortak olarak görülen bu durum, ağır taşıt trafiğinin az olduğu bölgelerde kullanılması durumunda, SBS-D, SBS-M ve EVA modifiye bitümleri kullanılarak hazırlanan karışımların yorulma dayanımlarının daha yüksek olacağını göstermektedir. Çatlak oluşumundaki deformasyon değerlerinin ( $\delta_i$ ) ortalamasının asfaltit içeriğiyle değişimi Şekil 5.58’de, yorulma ömrü ( $N_f$ ) değerindeki deformasyon miktarlarının ( $\delta_f$ ) ortalamasının asfaltit içeriğiyle değişimi Şekil 5.59’da, maksimum yük tekrar sayılarındaki deformasyon miktarlarının ( $\delta_{mak}$ ) ortalamasının asfaltit içeriğiyle değişimi ise Şekil 5.60’ta verilmiştir.



Şekil 5.58.  $N_i$  değerindeki deformasyon miktarı - katkı türü ilişkisi

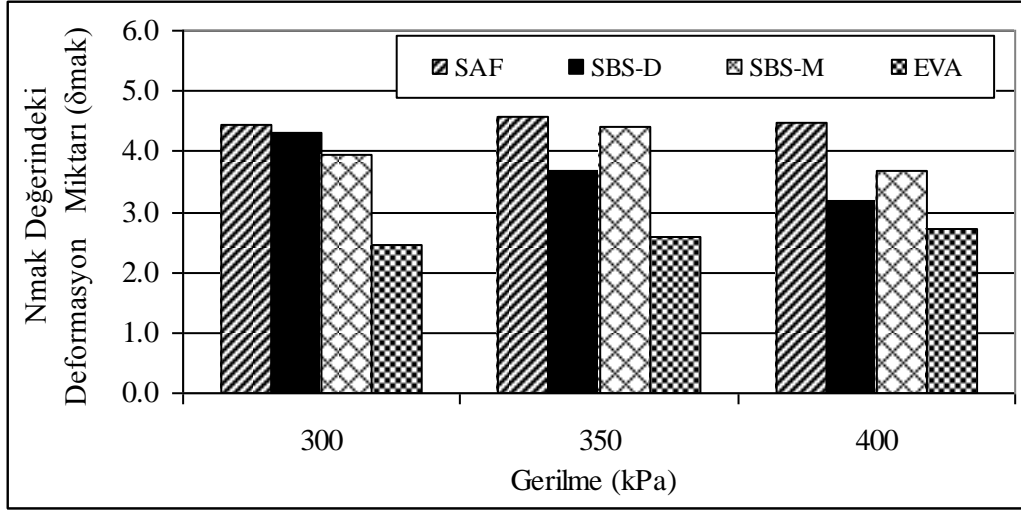
$N_i$  değerindeki deformasyon miktarları ( $\delta_i$ ) incelendiğinde (Şekil 5.58) katkı kullanımı ve gerilme artışı ile genel olarak deformasyon miktarlarının azaldığı gözlenmiştir. 300 kPa gerilme seviyesinde en yüksek  $\delta_i$  değerine %4 oranında SBS-D modifiyeli bitüm kullanılarak hazırlanan karışımlar sahip iken 350 ve 400 kPa gerilme seviyelerinde en yüksek  $\delta_i$  değerlerine saf karışım sahip olduğu belirlenmiştir. En düşük  $\delta_i$  değerine bütün

gerilme seviyelerinde %4 oranında EVA modifiyeli bitüm kullanılarak hazırlanan karışımların sahip olduğu belirlenmiştir.



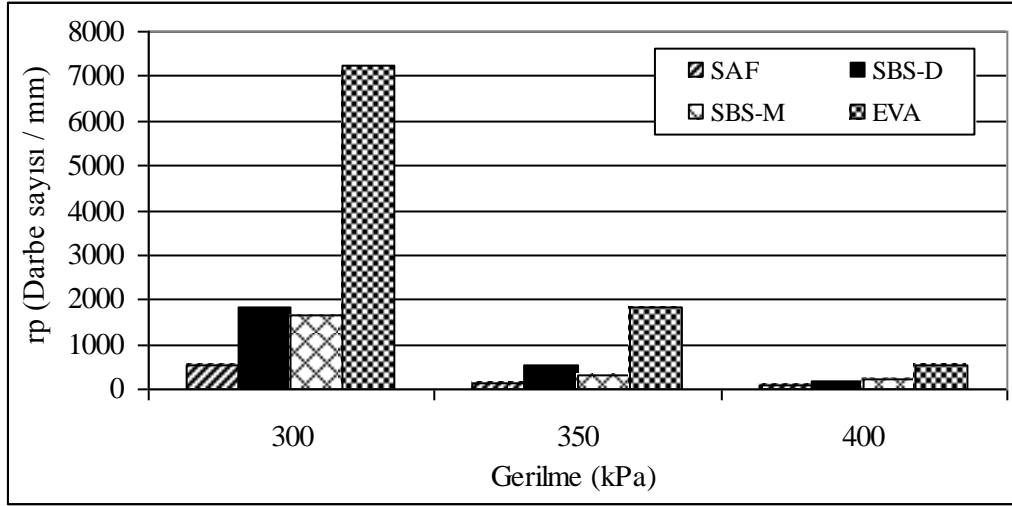
Şekil 5.59. N<sub>f</sub> değerindeki deformasyon miktarı - katkı türü ilişkisi

Şekil 5.59’da görülen N<sub>f</sub> değerindeki deformasyon miktarları (δ<sub>f</sub>) incelendiğinde katkı kullanımı ile deformasyon değerleri genel olarak azalırken gerilme seviyesi ile düzensiz bir değişimin meydana geldiği gözlenmiştir. δ<sub>i</sub> değerlerinde olduğu gibi 300 kPa gerilme seviyesinde en yüksek δ<sub>f</sub> değerine %4 oranında SBS-D modifiyeli bitüm kullanılarak hazırlanan karışımlar sahip iken 350 ve 400 kPa gerilme seviyelerinde en yüksek δ<sub>f</sub> değerlerine saf karışım sahip olduğu belirlenmiştir. En düşük δ<sub>f</sub> değerine bütün gerilme seviyelerinde %4 oranında EVA modifiyeli bitüm kullanılarak hazırlanan karışımların sahip olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 5.60.  $N_{\max}$  değerindeki deformasyon miktarı - katkı türü ilişkisi

Numunelerin maksimum yük tekrür sayısındaki maksimum deformasyon miktarlarının ortalamaları karşılaştırıldığında (Şekil 5.60) katkı kullanımı ile maksimum yük tekrür sayısındaki maksimum deformasyon miktarlarının azaldığı görülmektedir. Gerilme değişimi ile maksimum deformasyon miktarları düzensiz bir değişim sergilemiştir. Bütün gerilme seviyelerinde en yüksek  $\delta_{\max}$  değerine saf karışımın sahip olduğu, en düşük  $\delta_{\max}$  değerlerine ise %4 oranında EVA kullanılarak hazırlanan karışımların sahip olduğu tespit edilmiştir. Modifiye bitümlerle hazırlanan karışımlar dikkate alındığında en yüksek  $\delta_{\max}$  değerleri; 300 kPa gerilme seviyesinde SBS-D modifiyeli bağlayıcı ile hazırlanan karışımlarda, 350 ve 400 kPa gerilme seviyesinde SBS-M modifiyeli bağlayıcı ile hazırlanan karışımlardan elde edilmiştir. Elde edilen  $\delta_i$ ,  $\delta_f$  ve  $\delta_{\max}$  değerlerinden özellikle yüksek gerilme seviyelerinde (400 kPa) katkı kullanımı ile deformasyon değerlerinin azalacağı, dolayısıyla daha gevrek bir kırılmanın gözleneceğini göstermektedir. Çatlak ilerleme oranı değerlerinin ( $r_p$  ve  $r_f$ ) asfaltit içeriği ile değişimi Şekil 5.61 ve 5.62’de verilmiştir.

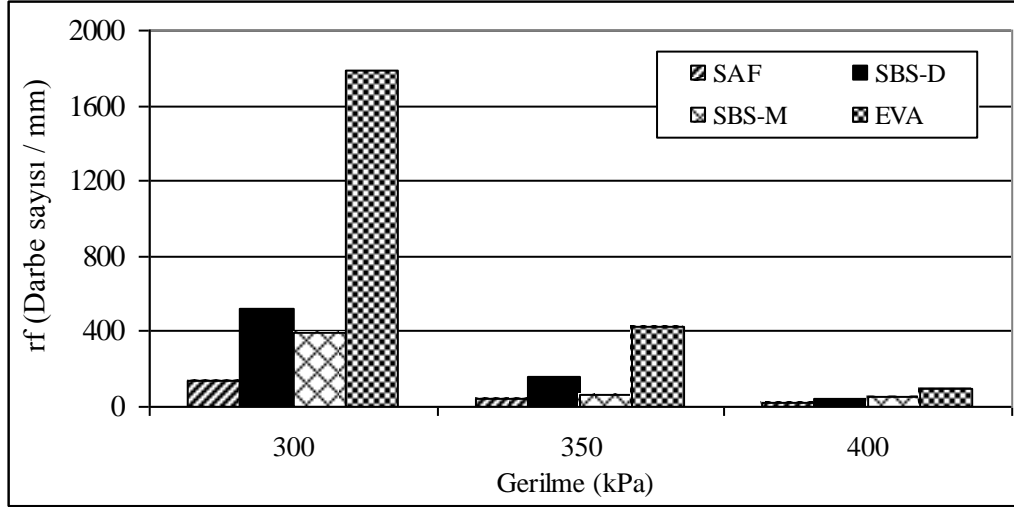


Şekil 5.61.  $N_i - N_f$  arası çatlak ilerleme oranı - katkı türü ilişkisi

Şekil 5.61’de görülen  $N_i - N_f$  arası çatlak ilerleme oranı ( $r_p$ ) değerlerinin katkı kullanımı ile değişimi incelendiğinde katkı kullanımı ile  $r_p$  değerlerinin arttığı, uygulanan gerilmenin artmasıyla da bu değer azaldığı belirlenmiştir. 300 kPa gerilme seviyesinde %4 oranında SBS-D içeren karışımlarda  $r_p$  değeri saf karışımın bu değerine göre 3,35 kat, SBS-M modifiye bitümü ile hazırlanan karışımlarda 3,03 kat ve EVA modifiye bitümü ile hazırlanan karışımlarda ise 13,15 kat artış gözlenmiştir. 350 kPa gerilme seviyesinde  $r_p$  değerleri incelendiğinde saf karışıma göre %4 oranında SBS-D içeren modifiye bitüm ile hazırlanan karışımın  $r_p$  değerinin 3,53 kat, SBS-M modifiye bitümü ile hazırlanan karışımın 1,96 kat ve EVA katkılı bağlayıcı ile hazırlanan karışımın 12,03 kat daha yüksek olduğu belirlenmiştir. 400 kPa gerilme seviyesinde ise bitüm oranının ağırlıkça %4 oranında SBS-D, SBS-M ve EVA içeren karışımlarda saf karışıma göre bu değer sırasıyla 1,89 kat, 2,33 kat ve 5,86 kat daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlardan en etkin katkı maddesinin EVA olduğu, SBS-D ve SBS-M katkılarının  $r_p$  değerleri üzerinde benzer etkiye sahip olduğu görülmektedir. Çatlak oluşuktan sonra her 1 mm deformasyon için gerekli yük tekrar sayısını ifade eden  $r_p$  değerlerinden, özellikle düşük gerilme seviyelerinde EVA modifiyeli bitümlerle hazırlanan karışımların çatlak ilerleyişine karşı dayanımının yüksek olduğu belirlenmiştir.

Gerilme seviyesinin 300 kPa’dan 450 kPa’ya yükselmesi ile  $r_p$  değerleri saf bağlayıcı ve SBS-D, SBS-M ve EVA modifiyeli bitümler ile hazırlanan karışımlarda sırasıyla 6,16 kat, 10,97 kat, 8,04 kat ve 13,83 kat azalmıştır. Bu durum  $r_p$  değerleri açısından gerilme seviyesindeki değişimden en fazla etkilenen karışımların EVA modifiye bitümü ile

hazırlanan karışımların, en az etkilenen karışımların ise saf karışımlar olduğu göstermektedir.



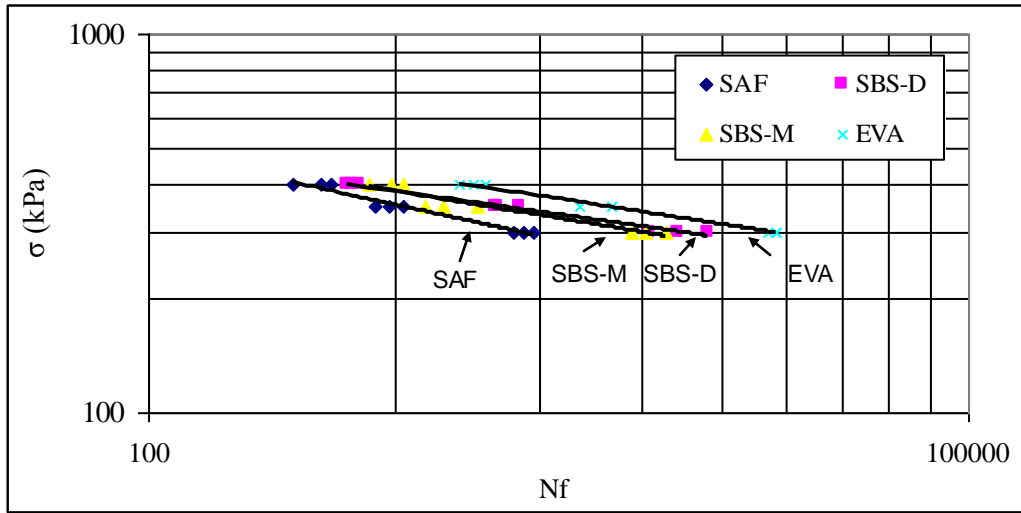
Şekil 5.62.  $N_f - N_{mak}$  arası çatlak ilerleme oranı - katkı türü ilişkisi

Şekil 5.62’de görülen  $N_f - N_{mak}$  arası çatlak ilerleme oranı ( $r_f$ ) değerlerinin katkı kullanımı ile değişimi incelendiğinde katkı kullanımı ile  $r_f$  değerlerinin arttığı, uygulanan gerilmenin artması ile bu değerlerin azaldığı belirlenmiştir. Katkı türlerinin  $r_f$  değerleri üzerindeki etkileri incelendiğinde  $r_p$  değerleriyle benzer bir değişim gözlenmiştir. En etkin katkı maddesinin EVA olduğu, etkinliği en az olan katkının 300 ve 350 kPa gerilme seviyelerinde SBS-M, 400 kPa gerilme seviyesinde ise SBS-D olduğu, bunun yanı sıra SBS-D ve SBS-M katkılarının yakın etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir.  $N_i - N_f$  arasındaki yük tekrar sayısı ve deformasyon miktarlarından elde edilen  $r_p$  değerleri ile  $N_f - N_{mak}$  arasındaki yük tekrar sayısı ve deformasyon miktarlarından elde edilen  $r_f$  değerleri karşılaştırıldığında  $r_p$  değerlerinin  $r_f$  değerlerinden yüksek olduğu belirlenmiştir. Bu durum, çatlak başlangıcından yorulma ömrünün sonuna kadar karışımların yük tekrarına karşı dayanımlarının yorulma ömründen sonra numune kırılıncaya kadar ki dönemde yük tekrarına karşı dayanımlarına göre daha yüksek olduğunu göstermektedir.

Karayolları Genel Müdürlüğü’ne göre yorulma çatlakları görülen bir yolda çatlak oluşumu iyice belirginleştğinde ve çatlakların genişliği arttığında çatlak alanı toplam alanın %30’undan az olduğunda çatlak olan alanın kesilip atılması ve boşalan alanın yamanması tavsiye edilmektedir. Çatlak alanının %30’dan fazla olması durumunda ise geçici çözüm olarak kaplama tabakasının harç tipi örtü tabakası veya sathi kaplama ile

kaplanması önerilmektedir. Kalıcı çözüm amaçlı olarak ise asfalt kaplamaların yeniden kullanım metodu ile iyileştirilmesi veya ilave tabaka yapılması tavsiye edilmektedir [53]. Çatlak ilerleme oranı değerleri ( $r_p$  ve  $r_f$ ) göz önünde bulundurulduğunda katkı kullanımı ile çatlak oluşumundan itibaren karışımların yük tekrarına karşı dayanımlarının artacağı, dolayısıyla BSK'ların yeniden yapım veya rehabilitasyon ihtiyaçlarının geciktirilebileceği söylenebilmektedir.

Yorulma ömrü değerleri kullanılarak ve Formül 4.40'da verilen Wöhler ilişkisinden faydalanılarak çizilen yorulma ömrü eğrileri Şekil 5.63'te verilmiştir. Şekil 5.63'teki grafiklerden elde edilen katsayılar Tablo 5.44'de verilmiştir.



Şekil 5.63. Karışımların yorulma ömrü diyagramları

Tablo 5.44. Yorulma deneyinden elde edilen değerler

| Katkı Türü | Yorulma Ömrü, $N_f$                     | $k_1$    | $k_2$ | $R^2$  |
|------------|---|----------|-------|--------|
| -          | $N_f = 1,01E+03 \times \sigma^{-0.157}$ | 1,01E+03 | 0,157 | 0,9651 |
| SBS-D      | $N_f = 7,66E+02 \times \sigma^{-0.103}$ | 7,66E+02 | 0,103 | 0,9868 |
| SBS-M      | $N_f = 8,50E+02 \times \sigma^{-0.119}$ | 8,50E+02 | 0,119 | 0,9146 |
| EVA        | $N_f = 9,08E+02 \times \sigma^{-0.112}$ | 9,08E+02 | 0,112 | 0,9901 |

Şekil 5.63'te görüldüğü üzere en düşük yorulma ömrüne saf karışım, en yüksek yorulma ömrüne ise %4 oranında EVA modifiyeli bitüm kullanılarak hazırlanan karışımların sahip olduğu belirlenmiştir. Katkı kullanımı ile yorulma ömürlerinin saf karışıma göre arttığı gözlenmiştir. SBS-D ve SBS-M modifiye bitümleri ile hazırlanan



karışımların yorulma ömürlerinin çok yakın olduğu tespit edilmiştir. Yorulma ömür bağıntılarından elde edilen Tablo 5.44'teki veriler incelendiğinde ise karışımlardan elde edilen yük tekrür sayılarının yüksek uyumlulukta olduğu, bütün karışımların belirtme katsayısının ( $R^2$ ) 0,9'un üzerinde olduğu,  $k_1$  ve  $k_2$  katsayılarının katkı kullanımı ile azaldığı belirlenmiştir. Molenaar ve Medani, yorulma çizgisinin eğimini ifade eden  $k_2$  değerinin yüksek olmasının karışımın daha kırılğan davranış sergilemesine, düşük olmasının ise karışımın daha esnek davranış göstermesine işaret ettiğini belirtmektedir [108]. Elastomer türü SBS-D ve SBS-M modifiye bitümleri kullanılarak hazırlanan karışımların  $k_2$  değerlerinin saf karışımın bu değerinden düşük olması elastik davranış bakımından tutarlı iken plastomer türü EVA modifiyeli bitüm ile hazırlanan karışımın bu değerinin saf karışıma göre düşük olması Molenaar ve Medani'nin çalışmasını desteklemektedir.

## **5.10. Karışımların Çatlak İlerleyişine Karşı Dayanımlarının Belirlenmesi**

Çalışmada, lineer elastik kırılma mekaniği (LEKM) prensiplerine göre iki farklı yöntemle deneyler yapılarak karışımların çatlak ilerleyişine karşı dayanımları değerlendirilmiştir.

### **5.10.1. Yarım Daire Şeklinde Numuneler Üzerinde Uygulanan Eğilme Deneyi**

LEKM prensiplerine uygun olarak EN 12697-44 standardına göre yarım daire numuneler 0°C, -10°C ve -20°C sıcaklıkta 5 mm/dak. deformasyon hızında kırılmıştır. Çalışmada, B 160/220, %4 oranında SBS-D, SBS-M ve EVA içeren modifiye bitümler kullanılarak optimum bitüm içeriklerinde karışım numuneleri yoğurmalı pres ile 150 mm çapında, 11-12 cm yüksekliğe ve % 4±1 boşluk oranına sahip olacak şekilde sıkıştırılmıştır. Numuneler, döner testere ile öncelikle 50 mm yüksekliğe sahip iki parçaya ardından yarım daire şekline sahip dört parçaya bölünmüştür. Ardından tezgah tipi testere kullanılarak numunelere 1 cm yüksekliğinde çentikler açılmıştır (Şekil 5.64).

Numuneler kesilirken ısınmayı engellemek amacıyla su ile soğutulduğundan kesme işleminden sonra 2 gün oda şartlarında güneş görmeyecek şekilde kurumaya bırakılmıştır. 2 günlük beklemenin kuruma için yeterli olduğu ağırlık kontrolü ile belirlenmiştir. Daha sonra numuneler lineer elastik kırılma mekaniği yaklaşımlarına uygun olarak EN 12697-44

standardında tanımlanan yarım daire eğilme deneyine tabi tutulmuştur. Deney numunelerinin bir kısmı Şekil 5.64'te verilmiştir.



Şekil 5.64. Numunelere çentik açılması ve deney numuneleri

Deneylerde hızı ayarlanabilen Marshall stabilite aleti kullanılmıştır. Cihaz 50 kN kapasiteli olup hızı 0,000 ile 75,000 aralığında ayarlanabilmektedir. Dijital ekranı sayesinde hız ayarlanabilmekte, geri kalan bütün kontrol cihazın kendi yazılımından yapılabilmektedir. Cihazda bulunan veri toplama sistemi sayesinde her bir değerden saniyede yaklaşık 10 veri bilgisayara aktarılabilir. Cihaz ve deney düzeneği Şekil 5.65'te, dijital ekran ise Şekil 5.66'da görülmektedir.



Şekil 5.65. Yarım daire eğilme deney düzeneği

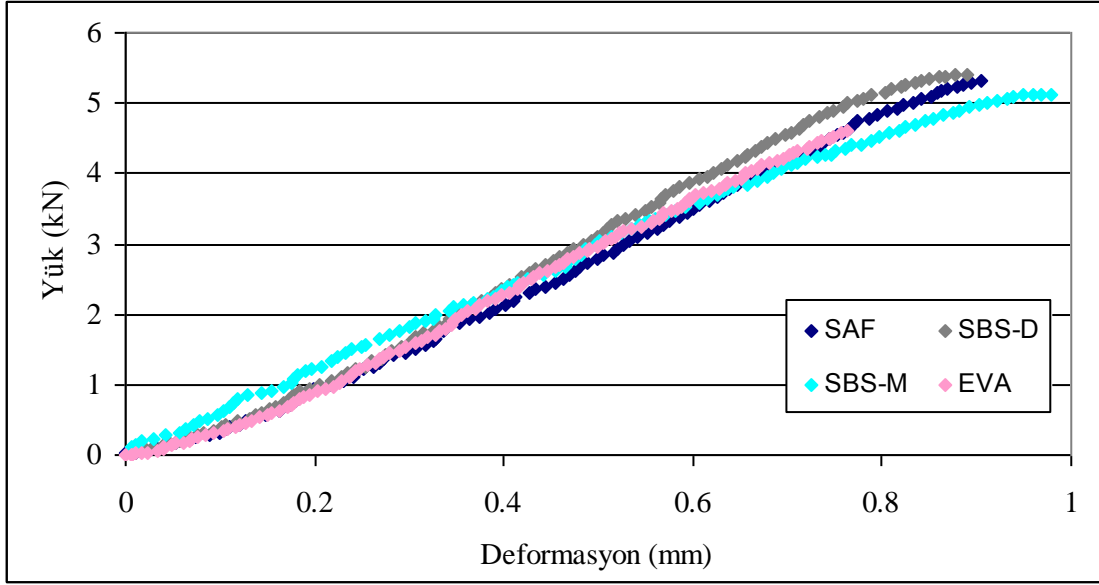


Şekil 5.66. Hızı ayarlanabilir marshall cihazının dijital göstergesi

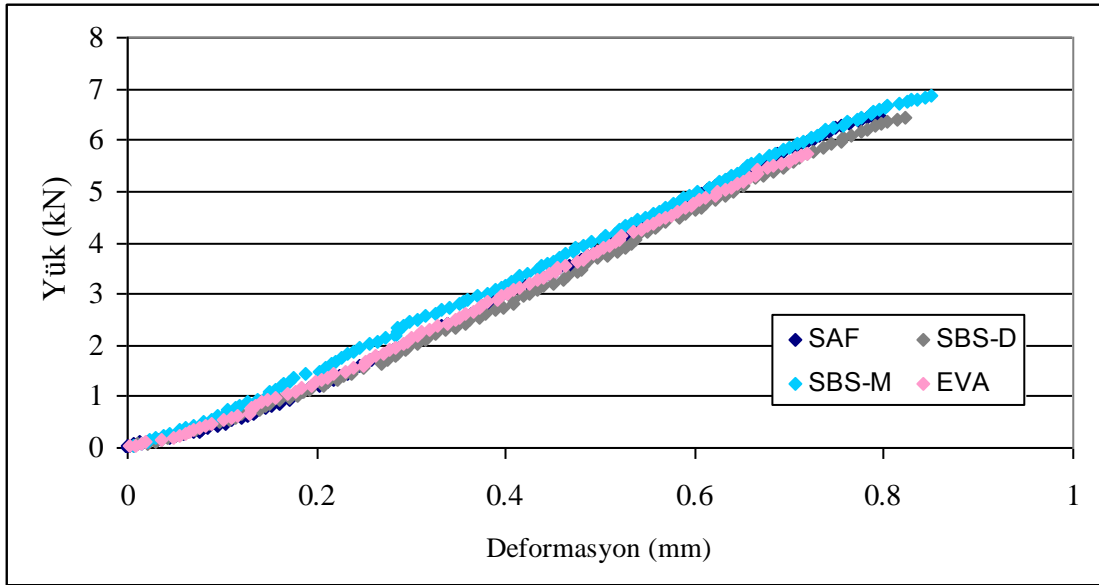
Saf bağlayıcı, %4 oranında SBS-D, SBS-M ve EVA modifiye bitümleri ile hazırlanan, 1 cm çentik yüksekliğine sahip kısa dönem yaşlandırılmış üçer numune 6 saat süresince 0°C, -10°C ve -20°C sıcaklıkta bekletilmiştir. Ardından yükleme aletinde 5 mm/dak yükleme hızında kırılmıştır. Elde edilen verilerden maksimum düşey deformasyon ve maksimum yük değerleri belirlenmiştir. Hızı ayarlanabilir Marshall aletinden yük değerleri kg olarak alınmış bu değerler N'a çevrilmiştir. Maksimum şekil değiştirme ( $\epsilon_{\text{mak}}$ ) Formül 4.51 kullanılarak, maksimum gerilme değeri ( $\sigma_{\text{mak}}$ ) Formül 4.52 kullanılarak, kırılma tokluğu değerleri ( $K_{IC}$ ), Formül 4.53 kullanılarak hesaplanmıştır. Kırılma tokluğu hesabında çatlak yüksekliği 9 mm < a < 11 mm ve numune yüksekliği 70 mm < W < 75 mm olduğundan  $f(\frac{a}{W}) = 5,956$  olarak alınmıştır.

Kısa dönem yaşlandırılmış numunelere 0°C, -10°C ve -20°C sıcaklıkta uygulanan deneylerden elde edilen değerler Tablo 5.45-47'de verilmiştir.

Üç farklı sıcaklıkta (0°C, -10°C ve -20°C) uygulanan yarım daire eğilme deneylerinden elde edilen yük-deformasyon eğrilerine birer örnek Şekil 5.67–5.69'da verilmiştir.



Şekil 5.67. 0°C sıcaklıkta numunelerin ortalama yük-deformasyon eğrileri



Şekil 5.68. -10°C sıcaklıkta numunelerin ortalama yük-deformasyon eğrileri

**Tablo 5.45.** Numunelere 0°C sıcaklıkta uygulanan LEKM yarım daire eğilme deney sonuçları

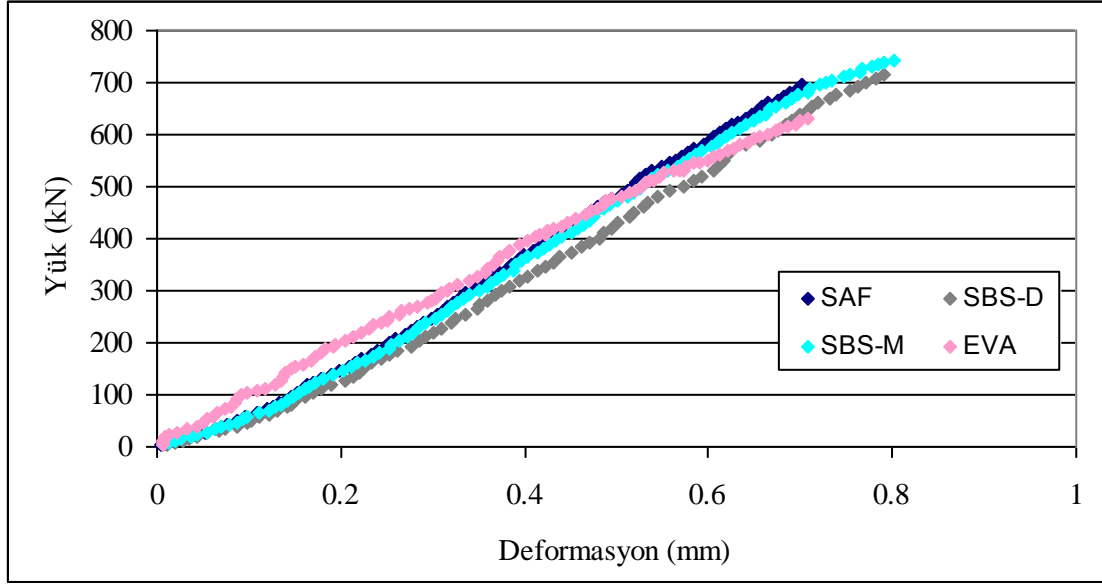
| Bağlayıcı Türü | Numune No   | h <sub>1</sub> (mm) | h <sub>2</sub> (mm) | h <sub>3</sub> (mm) | h <sub>ort</sub> (mm) | Mak. Yük (N)  | ε <sub>mak</sub> (%) | Yük-Deformasyon Doğru Denklemi | Doğru Denklemi R <sup>2</sup> Değeri | σ <sub>mak</sub> (N/mm <sup>2</sup> ) | K <sub>IC</sub> (N/mm <sup>3/2</sup> ) |
|----------------|-------------|---------------------|---------------------|---------------------|-----------------------|---------------|----------------------|--------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|--|
| B<br>160/220   | 1           | 50,1                | 49,8                | 50,2                | 50,0                  | 5546,6        | 1,258                | y = 658,2x - 10,398            | 0,9987                               | 3,1506                                | 18,765                                 |
|                | 2           | 50,5                | 50,2                | 50,3                | 50,3                  | 5252,3        | 1,226                | y = 611,98x - 13,07            | 0,9995                               | 2,9656                                | 17,663                                 |
|                | 3           | 50,8                | 50,5                | 50,3                | 50,5                  | 5305,2        | 1,230                | y = 646,1x - 31,824            | 0,9968                               | 2,9837                                | 17,771                                 |
|                | <b>Ort.</b> |                     |                     |                     |                       | <b>5368,0</b> | <b>1,238</b>         | <b>Y = 641,99x - 19,581</b>    | <b>0,9989</b>                        | <b>3,033</b>                          | <b>18,066</b>                          |
| SBS-D          | 1           | 49,7                | 49,8                | 50,1                | 49,9                  | 5243,4        | 1,253                | y = 630,57x - 41,34            | 0,9978                               | 2,9883                                | 17,799                                 |
|                | 2           | 50,4                | 50,4                | 50,6                | 50,5                  | 5628,0        | 1,092                | Y = 762,66x - 42,073           | 0,9963                               | 3,1694                                | 18,877                                 |
|                | 3           | 50,2                | 50,0                | 50,2                | 50,1                  | 5401,4        | 1,210                | Y = 695,18x - 31,824           | 0,9958                               | 3,0620                                | 18,237                                 |
|                | <b>Ort.</b> |                     |                     |                     |                       | <b>5424,3</b> | <b>1,185</b>         | <b>Y = 497,56x - 28,344</b>    | <b>0,9963</b>                        | <b>3,073</b>                          | <b>18,304</b>                          |
| SBS-M          | 1           | 50,9                | 50,7                | 50,7                | 50,8                  | 5124,7        | 1,332                | Y = 559,44x + 14,639           | 0,9955                               | 2,8689                                | 17,087                                 |
|                | 2           | 50,6                | 50,7                | 50,8                | 50,7                  | 5211,9        | 1,150                | Y = 674,55x + 3,3122           | 0,9964                               | 2,9215                                | 17,401                                 |
|                | 3           | 50,5                | 50,4                | 50,3                | 50,4                  | 5352,3        | 1,308                | Y = 616,56x - 46,631           | 0,9972                               | 3,0181                                | 17,976                                 |
|                | <b>Ort.</b> |                     |                     |                     |                       | <b>5229,7</b> | <b>1,263</b>         | <b>Y = 433,33x - 11,426</b>    | <b>0,9981</b>                        | <b>2,936</b>                          | <b>17,488</b>                          |
| EVA            | 1           | 51,1                | 50,9                | 50,8                | 50,9                  | 4606,5        | 1,039                | Y = 659,76x - 29,888           | 0,9964                               | 2,5704                                | 15,309                                 |
|                | 2           | 50,7                | 50,8                | 50,6                | 50,7                  | 4219,9        | 1,056                | Y = 569,84x - 10,718           | 0,9995                               | 2,3655                                | 14,089                                 |
|                | 3           | 50,4                | 50,5                | 50,2                | 50,4                  | 4166,3        | 1,069                | Y = 596,75x - 30,164           | 0,9969                               | 2,3509                                | 14,002                                 |
|                | <b>Ort.</b> |                     |                     |                     |                       | <b>4330,9</b> | <b>1,055</b>         | <b>Y = 398,72x - 12,019</b>    | <b>0,9986</b>                        | <b>2,429</b>                          | <b>14,467</b>                          |

**Tablo 5.46.** Numunelere -10°C sıcaklıkta uygulanan LEKM yarım daire eğilme deney sonuçları

| Bağlayıcı Türü | Numune No   | h <sub>1</sub> (mm) | h <sub>2</sub> (mm) | h <sub>3</sub> (mm) | h <sub>ort</sub> (mm) | Mak. Yük (N)  | ε <sub>mak</sub> (%) | Yük-Deformasyon Doğru Denklemi | Doğru Denklemi R <sup>2</sup> Değeri | σ <sub>mak</sub> (N/mm <sup>2</sup> ) | K <sub>IC</sub> (N/mm <sup>3/2</sup> ) |
|----------------|-------------|---------------------|---------------------|---------------------|-----------------------|---------------|----------------------|--------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|--|
| B<br>160/220   | 1           | 50,6                | 50,4                | 50,5                | 50,5                  | 6696,3        | 1,067                | Y = 968,65x – 33,76            | 0,9976                               | 3,7685                                | 22,445                                 |
|                | 2           | 50,2                | 50,4                | 50,4                | 50,3                  | 6625,7        | 1,112                | Y = 882,06x – 35,08            | 0,9979                               | 3,7411                                | 22,282                                 |
|                | 3           | 50,3                | 50,1                | 50,3                | 50,2                  | 6497,2        | 1,082                | Y = 890,33x – 42,82            | 0,9955                               | 3,6758                                | 21,893                                 |
|                | <b>Ort.</b> |                     |                     |                     |                       | <b>6606,4</b> | <b>1,087</b>         | <b>y = 914,33x – 37,782</b>    | <b>0,9973</b>                        | <b>3,728</b>                          | <b>22,207</b>                          |
| SBS-D          | 1           | 50,3                | 50,0                | 50,0                | 50,1                  | 6488,7        | 1,181                | y = 844,93x – 51,979           | 0,9955                               | 3,6808                                | 21,923                                 |
|                | 2           | 50,2                | 50,4                | 50,1                | 50,2                  | 6437,7        | 1,119                | y = 848,95x – 39,769           | 0,9957                               | 3,6422                                | 21,693                                 |
|                | 3           | 50,1                | 50,0                | 50,3                | 50,1                  | 6335,3        | 1,137                | y = 810,14x – 39,920           | 0,9952                               | 3,5914                                | 21,390                                 |
|                | <b>Ort.</b> |                     |                     |                     |                       | <b>6420,6</b> | <b>1,145</b>         | <b>y = 836,02x – 44,381</b>    | <b>0,9959</b>                        | <b>3,638</b>                          | <b>21,669</b>                          |
| SBS-M          | 1           | 50,6                | 50,7                | 50,5                | 50,6                  | 7040,1        | 1,061                | y = 1016,8x – 65,347           | 0,9949                               | 3,9542                                | 23,551                                 |
|                | 2           | 50,4                | 50,7                | 50,6                | 50,6                  | 6866,3        | 1,157                | y = 864,18x – 14,982           | 0,9993                               | 3,8591                                | 22,985                                 |
|                | 3           | 50,4                | 50,5                | 50,6                | 50,5                  | 7100,5        | 1,091                | y = 1018,1x – 43,158           | 0,9961                               | 3,9960                                | 23,800                                 |
|                | <b>Ort.</b> |                     |                     |                     |                       | <b>7002,3</b> | <b>1,103</b>         | <b>y = 964,67x – 41,133</b>    | <b>0,9975</b>                        | <b>3,936</b>                          | <b>23,445</b>                          |
| EVA            | 1           | 50,4                | 50,2                | 50,5                | 50,4                  | 5920,3        | 0,990                | y = 853,37x – 15,377           | 0,9994                               | 3,3406                                | 19,897                                 |
|                | 2           | 50,2                | 50,4                | 50,3                | 50,3                  | 5752,6        | 0,978                | y = 855,96x – 32,490           | 0,9975                               | 3,2503                                | 19,359                                 |
|                | 3           | 50,5                | 50,3                | 50,5                | 50,4                  | 6083,2        | 1,027                | Y = 904,2x – 59,187            | 0,9943                               | 3,4280                                | 20,417                                 |
|                | <b>Ort.</b> |                     |                     |                     |                       | <b>5918,7</b> | <b>0,998</b>         | <b>Y = 868,8x – 35,270</b>     | <b>0,9975</b>                        | <b>3,340</b>                          | <b>19,891</b>                          |

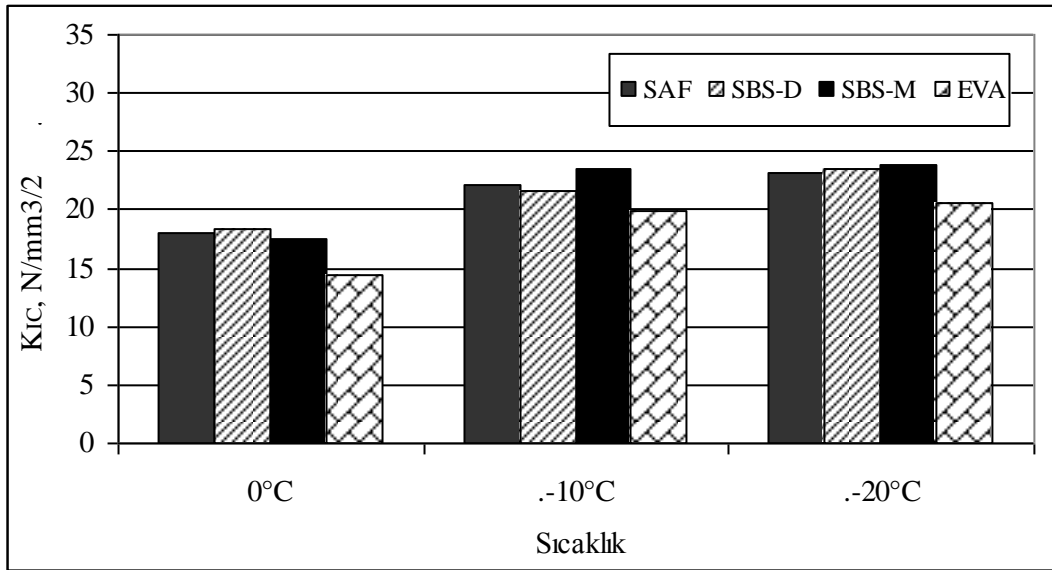
**Tablo 5.47.** Numunelere -20°C sıcaklıkta uygulanan LEKM yarım daire eğilme deney sonuçları

| Bağlayıcı Türü | Numune No   | h <sub>1</sub> (mm) | h <sub>2</sub> (mm) | h <sub>3</sub> (mm) | h <sub>ort</sub> (mm) | Mak. Yük (N)  | ε <sub>mak</sub> (%) | Yük-Deformasyon Doğru Denklemi | Doğru Denklemi R <sup>2</sup> Değeri | σ <sub>mak</sub> (N/mm <sup>2</sup> ) | K <sub>IC</sub> (N/mm <sup>3/2</sup> ) |
|----------------|-------------|---------------------|---------------------|---------------------|-----------------------|---------------|----------------------|--------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|--|
| B<br>160/220   | 1           | 50,3                | 50,5                | 50,3                | 50,4                  | 6630,6        | 1,031                | Y = 938,23x - 26,72            | 0,9985                               | 3,7414                                | 22,284                                 |
|                | 2           | 50,2                | 50,3                | 50,2                | 50,2                  | 7157,4        | 0,979                | Y = 1048,4x - 30,18            | 0,9983                               | 4,0494                                | 24,118                                 |
|                | 3           | 50,5                | 50,4                | 50,3                | 50,4                  | 6813,0        | 0,954                | Y = 1052,2x - 48,79            | 0,9958                               | 3,8418                                | 22,882                                 |
|                | <b>Ort.</b> |                     |                     |                     |                       | <b>6867,0</b> | <b>0,988</b>         | <b>y = 1008,4x - 33,355</b>    | <b>0,9963</b>                        | <b>3,878</b>                          | <b>23,094</b>                          |
| SBS-D          | 1           | 50,3                | 50,1                | 50,0                | 50,1                  | 7145,0        | 1,011                | Y = 1092,7x - 51,13            | 0,9987                               | 4,0504                                | 24,124                                 |
|                | 2           | 50,6                | 50,4                | 50,4                | 50,5                  | 7017,1        | 1,076                | Y = 969,35x - 53,54            | 0,9953                               | 3,9516                                | 23,536                                 |
|                | 3           | 50,5                | 50,7                | 50,7                | 50,6                  | 6890,5        | 1,019                | Y = 1013,2x - 63,02            | 0,9939                               | 3,8676                                | 23,035                                 |
|                | <b>Ort.</b> |                     |                     |                     |                       | <b>7017,6</b> | <b>1,035</b>         | <b>y = 1023,2x - 56,205</b>    | <b>0,9947</b>                        | <b>3,957</b>                          | <b>23,565</b>                          |
| SBS-M          | 1           | 50,7                | 50,4                | 50,5                | 50,5                  | 7237,9        | 1,056                | y = 988,96x - 17,278           | 0,9995                               | 4,0706                                | 24,245                                 |
|                | 2           | 50,8                | 51,0                | 50,9                | 50,9                  | 6869,3        | 0,995                | y = 1004,0x - 15,393           | 0,9994                               | 3,8355                                | 22,844                                 |
|                | 3           | 50,7                | 50,9                | 50,8                | 50,8                  | 7263,3        | 1,090                | y = 1018,2x - 45,497           | 0,9964                               | 4,0635                                | 24,202                                 |
|                | <b>Ort.</b> |                     |                     |                     |                       | <b>7123,5</b> | <b>1,047</b>         | <b>y = 1007,3x - 26,876</b>    | <b>0,9990</b>                        | <b>3,990</b>                          | <b>23,764</b>                          |
| EVA            | 1           | 50,3                | 50,5                | 50,5                | 50,4                  | 6144,0        | 0,910                | Y = 970,52x - 14,94            | 0,9995                               | 3,4622                                | 20,621                                 |
|                | 2           | 50,7                | 50,7                | 50,6                | 50,7                  | 6171,0        | 0,963                | Y = 908,36x + 13,72            | 0,9973                               | 3,4614                                | 20,616                                 |
|                | 3           | 50,5                | 50,6                | 50,8                | 50,6                  | 6090,0        | 0,918                | Y = 593,99x - 2,972            | 0,9995                               | 3,4183                                | 20,359                                 |
|                | <b>Ort.</b> |                     |                     |                     |                       | <b>6135,0</b> | <b>0,930</b>         | <b>y = 818,14x - 1,9321</b>    | <b>0,9994</b>                        | <b>3,447</b>                          | <b>20,532</b>                          |



Şekil 5.69. -20°C sıcaklıkta numunelerin ortalama yük-deformasyon eğrileri

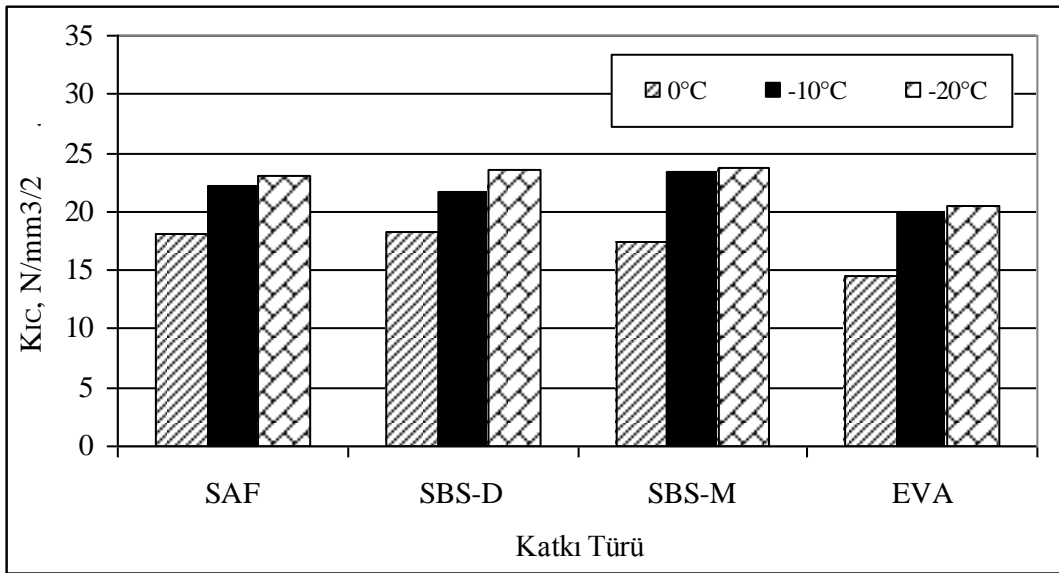
Elde edilen değerlerden yük-deformasyon eğrisine doğru yerleştirildiğinde karışımlardan elde edilen en düşük belirtme katsayısının ( $R^2$ ) 0,99'dan büyük olduğu tespit edilmiştir. Yük artışı ile deformasyon arasında lineere yakın bir değişimin olması ayrıca bütün numunelerde Şekil 4.26 (a)'da olduğu gibi maksimum yükte kırılmanın gerçekleşmesi, lineer elastik kırılma mekaniğinin uygulanabileceğini göstermektedir. Kırılma tokluğu ( $K_{IC}$ ) değerlerinin sıcaklıkla değişimi Şekil 5.70'de, katkı türü ile değişimi ise Şekil 5.71'de verilmektedir.



Şekil 5.70. Kırılma tokluğu ( $K_{IC}$ ) değerlerinin sıcaklıkla ilişkisi



Şekil 5.70'de görüldüğü üzere sıcaklık azaldıkça kırılma tokluğu değerleri artmıştır. Bütün sıcaklıklarda en düşük  $K_{IC}$  değerine EVA modifiyeli bitüm kullanılarak hazırlanan karışımların sahip olduğu, en yüksek değere ise  $0^{\circ}\text{C}$  sıcaklıkta SBS-D modifiye bitümü kullanılarak hazırlanan karışımların,  $-10^{\circ}\text{C}$  ve  $-20^{\circ}\text{C}$  sıcaklıklarda ise SBS-M modifiye bitümü kullanılarak hazırlanan karışımların sahip olduğu tespit edilmiştir.  $0^{\circ}\text{C}$  sıcaklıkta saf karışımın  $K_{IC}$  değerinin EVA modifiye bitümü ile hazırlanan karışıma göre %24,9 SBS-D modifiye bitümü ile hazırlanan karışımın  $K_{IC}$  değerinin EVA modifiyeli bağlayıcı kullanılarak hazırlanan karışımın bu değerinden %26,5 ve SBS-M modifiye bitümü ile hazırlanan karışımın %20,9 daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.  $-10^{\circ}\text{C}$  ve  $-20^{\circ}\text{C}$  sıcaklıklarda en yüksek  $K_{IC}$  değerine sahip olan SBS-M modifiye bitümü kullanılarak hazırlanan karışımın bu değerinin en düşük değere sahip olan EVA modifiye bitümü kullanılarak hazırlanan karışımlara göre sırasıyla %17,9 ve %15,7 oranlarında yüksek olduğu belirlenmiştir.



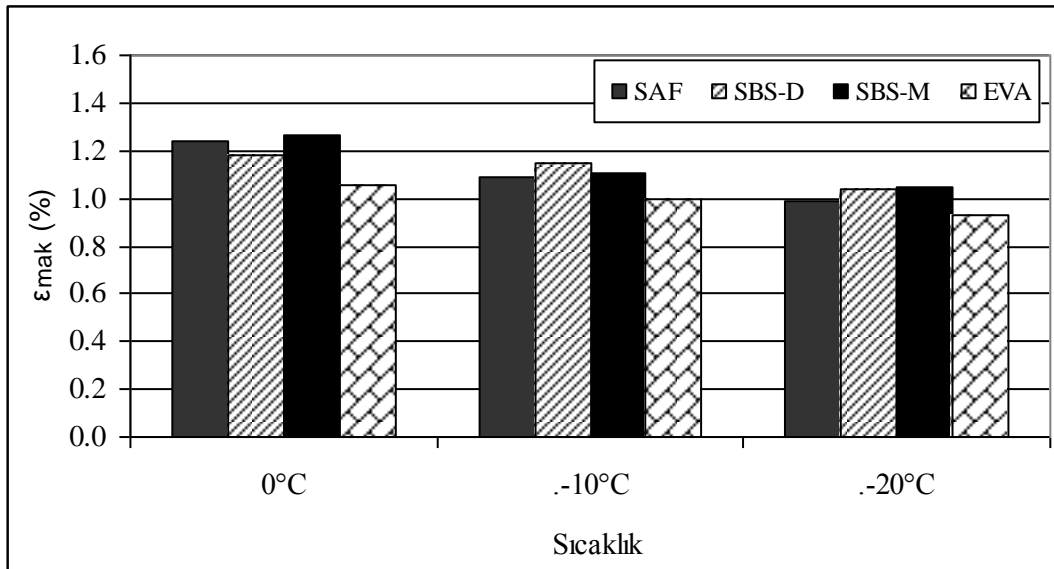
Şekil 5.71. Kırılma tokluğu ( $K_{IC}$ ) değerlerinin katkı türü ile ilişkisi

Sıcaklığın  $0^{\circ}\text{C}$ 'den  $-10^{\circ}\text{C}$ 'ye düşmesiyle  $K_{IC}$  değerleri önemli oranda artarken,  $-10^{\circ}\text{C}$ 'den  $-20^{\circ}\text{C}$ 'ye düşmesiyle bu artış miktarı azalmıştır. Sıcaklığın  $0^{\circ}\text{C}$ 'den  $-10^{\circ}\text{C}$ 'ye düşmesiyle B 160/220 bitümü, %4 oranında SBS-D, SBS-M ve EVA kullanılarak hazırlanan modifiye bitümler içeren karışımlarda  $K_{IC}$  değeri sırasıyla %22,9, %18,4, %34,1 ve %37,5 oranlarında artmıştır. B 160/220 bitümü, %4 oranında SBS-D, SBS-M ve EVA kullanılarak hazırlanan modifiye bitümler içeren karışımlarda sıcaklığın  $0^{\circ}\text{C}$ 'den  $-20^{\circ}\text{C}$ 'ye düşmesiyle  $K_{IC}$  değeri sırasıyla %27,8, %28,7, %35,9 ve %41,9 oranlarında artmıştır. Bu durum  $K_{IC}$  değerleri

açısından sıcaklıktan en fazla etkilenen karışımın EVA modifiye bitümü kullanılarak hazırlanan karışım olduğunu göstermektedir.

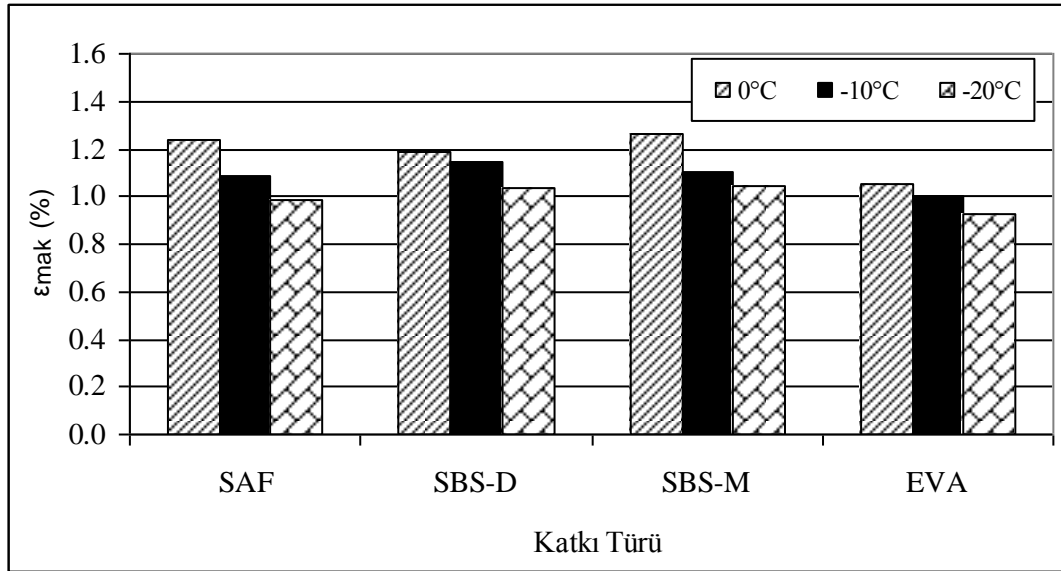
Lineer elastik kırılma mekaniğine göre  $K_{IC}$  değerinin yüksek olması kırılmaya karşı dayanımın fazla olacağını göstermektedir. Bu durumda  $0^{\circ}\text{C}$ 'de SBS-D,  $-10^{\circ}\text{C}$  ve  $-20^{\circ}\text{C}$ 'de SBS-M modifiye bitümü ile hazırlanan karışımların düşük sıcaklıklarda çatlak ilerleyişine karşı dayanımlarının en yüksek olacağı, EVA modifiye bitümü ile hazırlanan karışımların ise düşük sıcaklıklarda çatlak ilerleyişine karşı dayanımlarının en az olacağı söylenebilmektedir. Gerilme kontrollü yorulma deneyleri sonucunda çatlak ilerleyişine karşı en fazla dayanımı EVA modifiye bitümü ile hazırlanan karışımların, en düşük dayanımı ise saf karışımın gösterdiği belirlenmiştir. Kırılma tokluğu deneylerinde ise farklı sonuçlar elde edilmiştir. Yarım daire numuneler üzerinde yapılan kırılma tokluğu deneyi ile bitümlü sıcak karışımların çatlak ilerleyişine karşı dayanımları belirlendiğinden deney sıcaklığı ve malzeme davranışı göz önüne alındığında düşük ısı çatlaklarının ilerleyişine karşı veya çeşitli nedenlerle oluşmuş çatlakların düşük sıcaklıklarda ilerleyişine karşı en yüksek dayanıma  $0^{\circ}\text{C}$ 'de SBS-D,  $-10^{\circ}\text{C}$  ve  $-20^{\circ}\text{C}$ 'de SBS-M modifiye bitümü ile hazırlanan karışımların sahip olacağı söylenebilmektedir.

Maksimum şekil değiştirme ( $\epsilon_{\text{mak}}$ ) değerlerinin sıcaklıkla değişimi Şekil 5.72'de, katkı türü ile değişimi ise Şekil 5.73'te verilmiştir.



Şekil 5.72. Maksimum şekil değiştirme ( $\epsilon_{\text{mak}}$ ) değerlerinin sıcaklıkla ilişkisi

Şekil 5.72’de görüldüğü üzere bütün sıcaklıklarda en düşük  $\epsilon_{\text{mak}}$  değerine EVA modifiyeli bitüm kullanılarak hazırlanan karışımların sahip olduğu tespit edilmiştir. Karışımlar içerisinde en yüksek değere ise 0°C ve -20°C sıcaklıkta SBS-M modifiye bitümü kullanılarak hazırlanan karışımların, -10°C ve sıcaklıklarda ise SBS-D modifiye bitümü kullanılarak hazırlanan karışımların sahip olduğu tespit edilmiştir. 0°C ve -20°C sıcaklıkta SBS-M modifiye bitümü kullanılarak hazırlanan karışımların  $\epsilon_{\text{mak}}$  değerlerinin EVA modifiye bitümü ile hazırlanan karışımlara göre sırasıyla %19,8 ve %12,6 daha yüksek olduğu belirlenmiştir. -10°C sıcaklıkta ise SBS-D modifiye bitümü kullanılarak hazırlanan karışımların  $\epsilon_{\text{mak}}$  değerlerinin EVA modifiye bitümü ile hazırlanan karışımlara göre sırasıyla %14,7 daha yüksek olduğu belirlenmiştir.



Şekil 5.73. Maksimum şekil değişirme ( $\epsilon_{\text{mak}}$ ) değerlerinin katkı türü ile ilişkisi

Şekil 5.73 incelendiğinde sıcaklık azaldıkça maksimum şekil değişirme değerlerinin azaldığı görülmektedir. Sıcaklığın 0°C’den -10°C’ye düşmesiyle B 160/220 bitümü, %4 oranında SBS-D, SBS-M ve EVA kullanılarak hazırlanan modifiye bitümler içeren karışımlarda  $\epsilon_{\text{mak}}$  değeri sırasıyla %13,9, %3,5, %14,5 ve %5,6 oranlarında azalmıştır. B 160/220 bitümü, %4 oranında SBS-D, SBS-M ve EVA kullanılarak hazırlanan modifiye bitümler içeren karışımlarda sıcaklığın 0°C’den -20°C’ye düşmesiyle  $K_{IC}$  değeri sırasıyla %25,3, %14,5, %20,6 ve %13,4 oranlarında azalmıştır. EVA modifiyeli bitüm ile hazırlanan karışımların  $\epsilon_{\text{mak}}$  değerinin sıcaklıktan en az oranda etkilenmesi bütün sıcaklıklarda EVA içeren karışımların  $\epsilon_{\text{mak}}$  değerinin küçük olmasından kaynaklanmaktadır. Şekil 5.72 ve 5.73’den faydalanılarak düşük sıcaklıklarda elastomer türü (SBS-D ve SBS-M) katkı

kullanımı ile düşük sıcaklıklarda elastik şekil değiştirmenin genel olarak arttırılabileceği, plastomer türü katkı (EVA) kullanımı ile düşük sıcaklıklarda maksimum şekil değiştirme değerlerinin azalacağı söylenebilmektedir.

### 5.10.2. Üç Nokta Kiriş Eğilme Deneyi

Çalışmada LEKM prensiplerine uygun olarak dikdörtgenler prizması şeklindeki kirişler üzerinde kırılma deneyleri uygulanmıştır. Öncelikle merdaneli sıkıştırıcı kullanılarak saf ve polimer modifiye bitümler içeren optimum bitüm içeriğinde karışım numuneleri hazırlanmıştır. Numune geometrisi Kim ve Hussein tarafından yapılan çalışma referans alınarak seçilmiştir [128].

Kullanılacak malzeme miktarı bitümlü karışımın maksimum özgül ağırlığı ( $G_{mm}$ ), kalıbın iç boyutları (L ve l), numunenin kalınlığı (e), boşluk içeriği ( $v$ )'ne göre Formül 4.55 yardımıyla belirlenmiştir. %4 boşluk oranı için kullanılacak karışım ağırlıkları aşağıdaki Tablo 5.48'de verilmiştir.

**Tablo 5.48.** Kiriş numunelerinin boyut ve ağırlıkları

| Katkı Türü | Boşluk oranı, % | Numune yüksekliği, mm | Kalıp boyutu, cm | Karışım hacmi, cm <sup>3</sup> | $G_{mm}$ , kg/m <sup>3</sup> | $M_{kar.}$ , Kg |
|------------|-----------------|-----------------------|------------------|--------------------------------|------------------------------|-----------------|
| SAF        | 4               | 50                    | 30,5 x 30,5      | 4651.25                        | 2,397                        | 10,7031         |
| SBS-D      |                 |                       |                  |                                | 2,386                        | 10,6540         |
| SBS-M      |                 |                       |                  |                                | 2,385                        | 10,6495         |
| EVA        |                 |                       |                  |                                | 2,394                        | 10,6897         |

Karışım ağırlıkları belirlendikten sonra optimum bitüm içeriklerine uygun olarak agrega ve bitüm ağırlıkları belirlenmiştir. Agrega ve bitüm ağırlıkları Formül 5.2 ve 5.3 yardımıyla belirlenmiştir.

$$M_{ag.} + \frac{M_{ag.} * OBI}{P_{ag.}} = M_{kar.} \quad (5.2)$$

$$M_{bitüm} = M_{kar.} - M_{ag.} \quad (5.3)$$

Formülde  $M_{ag}$ . Agreganın ağırlığını (kg),  $OBI$ , optimum bitüm içeriğini (%),  $P_{ag}$  karışımdaki agreganın yüzdesini,  $M_{kar}$  ise karışım ağırlığını (kg),  $M_{bitüm}$  ise bitüm ağırlığını (kg) göstermektedir. Yukarıda verilen bağıntılar yardımıyla belirlenen, karışımlar için gerekli agreganın ve bitüm miktarları Tablo 5.49'da verilmiştir.

**Tablo 5.49.** Karışım numuneleri için gerekli agreganın ve bitüm miktarları

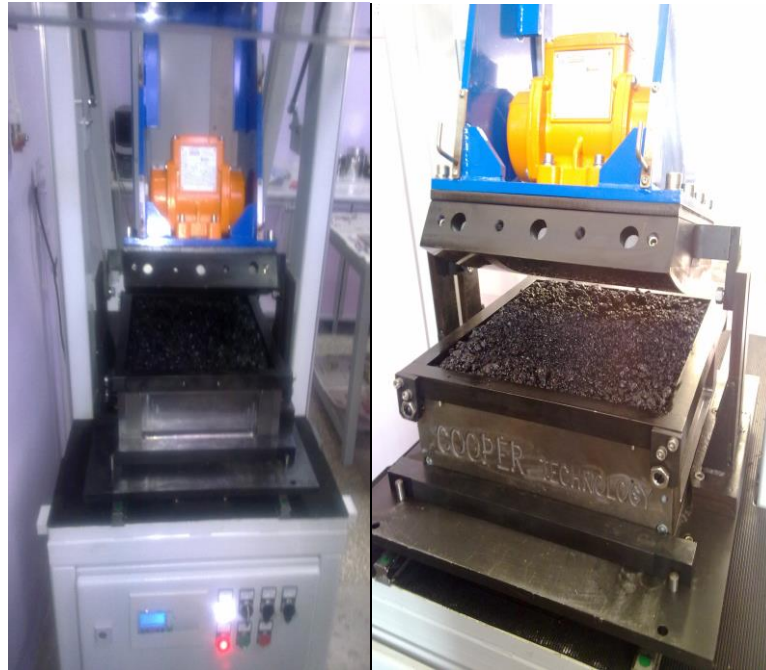
| Katkı Türü | OBI<br>% | $P_{ag}$ .<br>% | $M_{kar}$ .<br>kg | $M_{ag}$ .<br>kg | $M_{ag}$ .<br>Gr | $M_{bitüm}$<br>kg | $M_{bitüm}$<br>gr |
|------------|----------|-----------------|-------------------|------------------|------------------|-------------------|-------------------|
| SAF        | 4,88     | 95,12           | 10,7031           | 10,1808          | 10180,8          | 0,5223            | 522,3             |
| SBS-D      | 5,27     | 94,73           | 10,6540           | 10,0925          | 10092,5          | 0,5615            | 561,5             |
| SBS-M      | 5,35     | 94,65           | 10,6495           | 10,0798          | 10079,8          | 0,5697            | 569,7             |
| EVA        | 5,07     | 94,93           | 10,6897           | 10,1477          | 10147,7          | 0,5420            | 542,0             |

Agreganın miktarları belirlendikten sonra gradasyona uygun olarak her bir elek üzerinde kalan agregadan kullanım miktarları tespit edilerek Tablo 5.50'de verilmiştir.

**Tablo 5.50.** Karışımlar için her bir elek üzerinde kalan agreganın miktarları

| Elek No.             | % Geçen | % Kalan | Kullanılan, % | Kullanılan, gr |         |         |         |
|----------------------|---------|---------|---------------|----------------|---------|---------|---------|
|                      |         |         |               | SAF            | SBS-D   | SBS-M   | EVA     |
| ¾"                   | 100     | 0       | 0             | 0              | 0       | 0       | 0       |
| ½"                   | 95      | 5       | 5             | 509,0          | 504,6   | 504,0   | 507,4   |
| 3/8"                 | 88      | 12      | 7             | 712,7          | 706,5   | 705,6   | 710,3   |
| No.4                 | 65      | 35      | 23            | 2341,6         | 2321,3  | 2318,3  | 2334,0  |
| No.8                 | 35      | 65      | 30            | 3054,2         | 3027,8  | 3023,9  | 3044,3  |
| No.16                | 23      | 77      | 12            | 1221,7         | 1211,1  | 1209,6  | 1217,7  |
| No.30                | 14      | 86      | 9             | 916,3          | 908,3   | 907,2   | 913,3   |
| No.50                | 10      | 90      | 4             | 407,2          | 403,7   | 403,2   | 405,9   |
| No.100               | 8       | 92      | 2             | 203,6          | 201,9   | 201,6   | 203,0   |
| No.200               | 5       | 95      | 3             | 203,6          | 201,9   | 201,6   | 203,0   |
| Filler               | -       | 100     | 5             | 610,8          | 605,6   | 604,8   | 608,9   |
| Toplam agreganın, gr | -       | -       | -             | 10180,8        | 10092,5 | 10079,8 | 10147,7 |

Gradasyona uygun olarak hazırlanan agrega karışımları 3 saat, bitüm ise 2 saat karıştırma sıcaklığında bekletildikten sonra agrega yüzeyi tam olarak bitümle kaplanıncaya kadar mikser yardımıyla agrega ve bitüm karıştırılmıştır. Hazırlanan bitümlü sıcak karışım numuneleri 4 saat etüvde kısa dönem yaşlandırma prosedürüne tabi tutulmuştur. Ardından 30,5x30,5x5 cm boyutlarındaki kalıba ilave yaka takılmış, karışım kalıba doldurulmuştur. Karışım spatula yardımıyla şişlenmiş ardından numunenin yüzeyi düzeltilmiştir. Kalıp ve karışım merdaneli sıkıştırıcıya konulmuş ve pas sayısı cihaza girilmiştir. Sıkıştırma esnasında kalıbın önce öne doğru sonrasında arkaya doğru gidişi bir pas olarak isimlendirilmektedir. Çalışmada 40 pas sayısı kullanılmıştır. Çalışmada saf ve modifiye bitüm kullanılarak hazırlanan karışımlar titreşim kullanılarak hazırlanmıştır. Öncelikle basınç sıfırlanmış, iki pas yük verilmeden yapılmış böylece malzemenin tam olarak kalıba yerleşmesi sağlanmıştır. Ardından basınç yavaşça arttırılmış ve 300 PSI yük seviyesine ayarlanmıştır. Pas sayısı arttıkça yük değeri azalmıştır. Yükün sıfır olması karışımın istenen yüksekliğe geldiğini ifade etmektedir. Numunelerin sıkıştırılması ve merdaneli sıkıştırıcı Şekil 5.74'te görülmektedir. Numunenin sıkıştırma işlemi bittikten sonra numune merdaneli sıkıştırıcıdan çıkarılmış ve soğumaya bırakılmıştır. Numune tamamen soğuduktan sonra testere yardımıyla deney geometrisine (70 mm yükseklik, 50 mm derinlik ve 300 mm genişlik) uygun numuneler hazırlanmış ardından numunelerde çentik açılmıştır.



Şekil 5.74. Merdaneli sıkıştırıcı ile numune hazırlanması

Deneyde hızı ayarlanabilen Marshall deney aleti kullanılmıştır. Deney için özel bir deney aparatı hazırlanmıştır. Bu aparatla mesnetler arasındaki açıklığın 28 cm olması sağlanmıştır. Hazırlanan numuneler, hızı ayarlanabilen Marshall deney aletine monte edilen deney aparatı üzerine yerleştirilmiş ve deney bu şekilde uygulanmıştır. Deney düzeneği ve deney numuneleri Şekil 5.75’te görülmektedir.

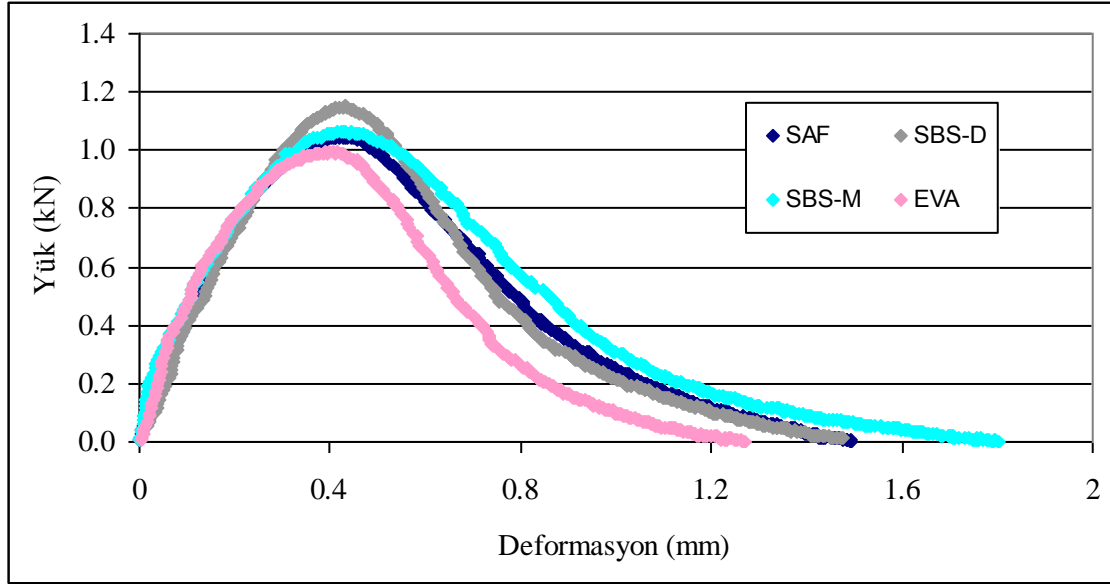


Şekil 5.75. Üç nokta kiriş eğilme deney düzeneği ve deneye tabi tutulmuş numuneler

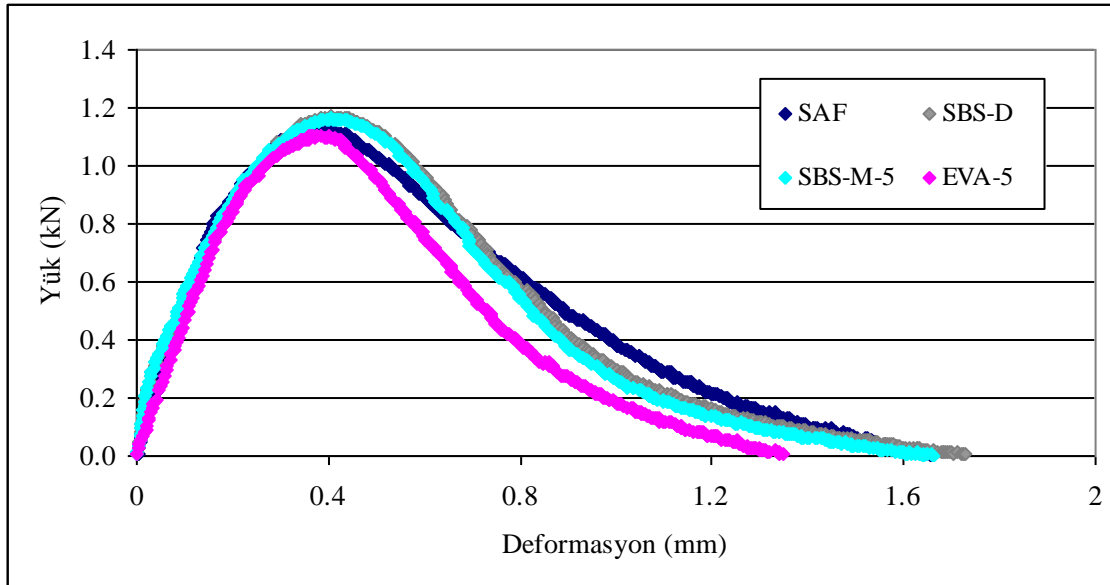
Saf bağlayıcı, %4 oranında SBS-D, SBS-M ve EVA modifiye bitümleri ile hazırlanan, 2 cm çentik yüksekliğine sahip kısa dönem yaşlandırılmış üçer numune 6 saat süresince 0°C, -10°C ve -20°C sıcaklıkta bekletilmiştir. Ardından yükleme aletinde 3.24 mm/dak yükleme hızında kırılmıştır. Elde edilen verilerden maksimum düşey deformasyon ve maksimum yük değerleri belirlenmiştir. Hızı ayarlanabilir Marshall aletinden yük değerleri kg olarak alınmış bu değerler N’a çevrilmiştir. Çalışmada öncelikle Formül 4.56 Kullanılarak Elastisite modülü değerleri hesaplanmıştır. Bu formülde P/2 değerine karşılık gelen  $\delta$  değeri kullanılmıştır. Bu yük ve deformasyon değerinde sadece mevcut açılan çatlak ( $\alpha_0=0.3$ ) olduğundan yani kırılma başlamadığından  $F(\alpha)$  değeri 0,143 olarak hesaplanmıştır. Daha sonra  $P_{mak}$  ve  $\delta_{mak}$  değerleri kullanılarak yeniden Formül 4.56 kullanılmış ve maksimum yük değerindeki  $F(\alpha)$  değerleri belirlenmiştir. Bu  $F(\alpha)$  değerinden Formül 4.57’de belirtilen integral yardımıyla  $\alpha$  değerleri belirlenmiştir. En sonunda bütün veriler faydalanılarak ve Formül 4.61 kullanılarak  $K_{IC}$  değerleri belirlenmiştir.

Kısa dönem yaşlandırılmış kiriş numunelere 0°C, -10°C ve -20°C sıcaklıkta uygulanan deneylerden elde edilen değerler Tablo 5.51–5.53’de verilmiştir. Üç farklı sıcaklıkta (0°C,

-10°C ve -20°C) uygulanan yarım daire eğilme deneylerinden elde edilen yük-deformasyon eğrilerine birer örnek Şekil 5.76–5.78’de verilmiştir.



Şekil 5.76. 0°C sıcaklıkta numunelerden elde edilen örnek yük – deformasyon eğrileri



Şekil 5.77. -10°C sıcaklıkta numunelerden elde edilen örnek yük – deformasyon eğrileri



**Tablo 5.51.** Kiriş numunelere 0°C sıcaklıkta uygulanan LEKM deney sonuçları

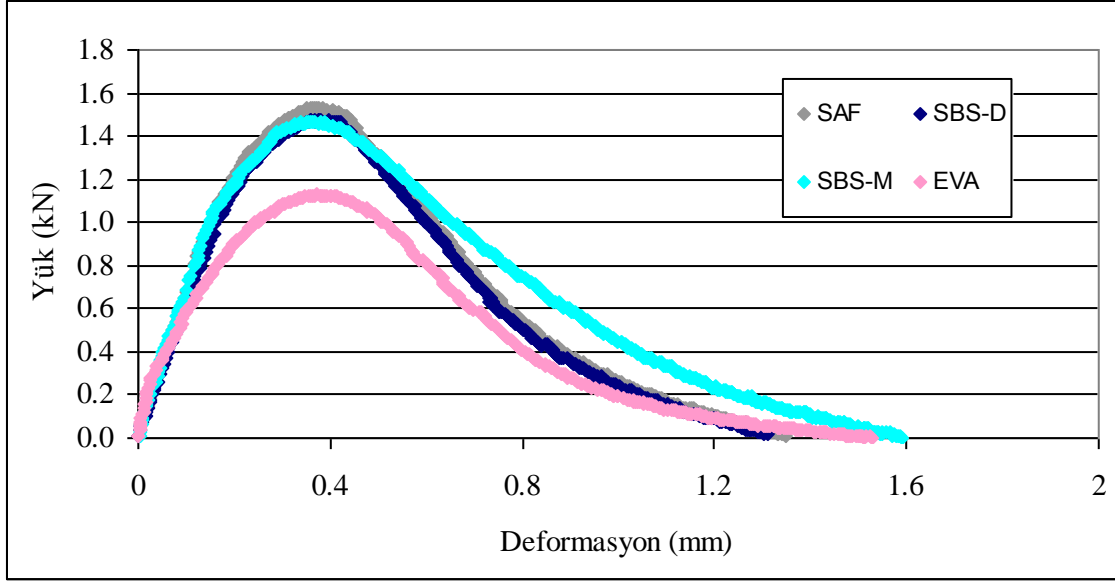
| Bağlayıcı Türü | Numune No   | B (mm) | S (mm) | W (mm) | w (N) | P <sub>i</sub> (N) | δ <sub>i</sub> (%) | E (N/mm <sup>2</sup> ) | P <sub>max</sub> (N) | δ <sub>mak</sub> (%) | F(α)          | f(α) | α     | K <sub>IC</sub> (N/mm <sup>3/2</sup> ) |
|----------------|-------------|--------|--------|--------|-------|--------------------|--------------------|------------------------|----------------------|----------------------|---------------|------|-------|--|
| B<br>160/220   | 1           | 50,0   | 280    | 70,0   | 8,05  | 506,51             | 0,1027             | 3498                   | 1013,01              | 0,4042               | 0,701         | 2,79 | 0,545 | 30,259                                 |
|                | 2           | 50,1   |        | 70,0   | 8,07  | 476,48             | 0,1174             | 2909                   | 952,97               | 0,3970               | 0,576         | 2,60 | 0,516 | 25,760                                 |
|                | 3           | 50,0   |        | 70,1   | 8,06  | 522,39             | 0,1277             | 2878                   | 1044,78              | 0,4488               | 0,595         | 2,63 | 0,520 | 28,658                                 |
|                | <b>Ort.</b> |        |        |        |       |                    |                    |                        | <b>3095</b>          | <b>1003,59</b>       | <b>0,4167</b> |      |       |  |
| SBS-D          | 1           | 50,0   | 280    | 70,0   | 8,01  | 575,44             | 0,1362             | 2927                   | 1150,87              | 0,4335               | 0,501         | 2,48 | 0,495 | 29,103                                 |
|                | 2           | 50,0   |        | 70,0   | 8,01  | 559,70             | 0,1345             | 2897                   | 1119,41              | 0,4563               | 0,554         | 2,57 | 0,510 | 29,718                                 |
|                | 3           | 50,1   |        | 70,0   | 8,03  | 531,83             | 0,1131             | 3297                   | 1063,66              | 0,4231               | 0,646         | 2,71 | 0,533 | 30,389                                 |
|                | <b>Ort.</b> |        |        |        |       |                    |                    |                        | <b>3040</b>          | <b>1111,31</b>       | <b>0,4376</b> |      |       |  |
| SBS-M          | 1           | 50,1   | 280    | 70,0   | 8,02  | 547,67             | 0,1181             | 3235                   | 1095,34              | 0,4326               | 0,622         | 2,67 | 0,527 | 30,720                                 |
|                | 2           | 50,1   |        | 70,1   | 8,04  | 523,86             | 0,1294             | 2838                   | 1047,72              | 0,4217               | 0,531         | 2,53 | 0,504 | 27,162                                 |
|                | 3           | 50,0   |        | 70,1   | 8,02  | 551,64             | 0,1291             | 2973                   | 1103,29              | 0,4458               | 0,571         | 2,59 | 0,514 | 29,651                                 |
|                | <b>Ort.</b> |        |        |        |       |                    |                    |                        | <b>3015</b>          | <b>1082,11</b>       | <b>0,4333</b> |      |       |  |
| EVA            | 1           | 50,1   | 280    | 70,0   | 8,06  | 425,58             | 0,1261             | 2475                   | 851,17               | 0,4140               | 0,569         | 2,59 | 0,514 | 22,915                                 |
|                | 2           | 50,0   |        | 70,0   | 8,04  | 480,49             | 0,1227             | 2806                   | 960,98               | 0,4261               | 0,597         | 2,63 | 0,521 | 26,481                                 |
|                | 3           | 50,0   |        | 70,1   | 8,05  | 496,02             | 0,1172             | 3005                   | 992,03               | 0,4169               | 0,612         | 2,66 | 0,525 | 27,621                                 |
|                | <b>Ort.</b> |        |        |        |       |                    |                    |                        | <b>2762</b>          | <b>934,73</b>        | <b>0,4190</b> |      |       |  |

**Tablo 5.52.** Kiriş numunelere -10°C sıcaklıkta uygulanan LEKM deney sonuçları

| Bağlayıcı Türü | Numune No   | B (mm) | S (mm) | W (mm) | w (N) | P <sub>i</sub> (N) | δ <sub>i</sub> (%) | E (N/mm <sup>2</sup> ) | P <sub>max</sub> (N) | δ <sub>mak</sub> (%) | F(α)          | f(α) | α     | K <sub>IC</sub> (N/mm <sup>3/2</sup> ) |
|----------------|-------------|--------|--------|--------|-------|--------------------|--------------------|------------------------|----------------------|----------------------|---------------|------|-------|--|
| B<br>160/220   | 1           | 50,1   | 280    | 70,1   | 8,08  | 575,05             | 0,1113             | 3566                   | 1150,10              | 0,4066               | 0,614         | 2,66 | 0,525 | 31,957                                 |
|                | 2           | 50,0   |        | 70,0   | 8,05  | 555,50             | 0,0927             | 4180                   | 1111,00              | 0,3785               | 0,722         | 2,82 | 0,549 | 33,646                                 |
|                | 3           | 50,0   |        | 70,0   | 8,05  | 564,10             | 0,1179             | 3329                   | 1128,20              | 0,3947               | 0,543         | 2,55 | 0,507 | 29,660                                 |
|                | <b>Ort.</b> |        |        |        |       |                    |                    |                        | <b>3692</b>          | <b>1129,77</b>       | <b>0,3933</b> |      |       |  |
| SBS-D          | 1           | 50,0   | 280    | 70,0   | 8,01  | 585,05             | 0,1087             | 3718                   | 1170,10              | 0,4061               | 0,630         | 2,68 | 0,529 | 33,066                                 |
|                | 2           | 50,1   |        | 70,1   | 8,04  | 602,40             | 0,1147             | 3594                   | 1204,80              | 0,4196               | 0,608         | 2,65 | 0,524 | 33,305                                 |
|                | 3           | 50,1   |        | 70,0   | 8,03  | 587,70             | 0,1183             | 3424                   | 1175,40              | 0,4015               | 0,549         | 2,56 | 0,508 | 30,974                                 |
|                | <b>Ort.</b> |        |        |        |       |                    |                    |                        | <b>3579</b>          | <b>1183,43</b>       | <b>0,4091</b> |      |       |  |
| SBS-M          | 1           | 50,0   | 280    | 70,0   | 8,01  | 578,00             | 0,1016             | 3938                   | 1156,00              | 0,4001               | 0,680         | 2,76 | 0,540 | 33,944                                 |
|                | 2           | 50,0   |        | 70,0   | 8,01  | 582,45             | 0,1032             | 3902                   | 1164,90              | 0,4046               | 0,675         | 2,75 | 0,539 | 34,068                                 |
|                | 3           | 50,0   |        | 70,0   | 8,01  | 606,80             | 0,1199             | 3475                   | 1213,60              | 0,4146               | 0,560         | 2,57 | 0,511 | 32,338                                 |
|                | <b>Ort.</b> |        |        |        |       |                    |                    |                        | <b>3772</b>          | <b>1178,17</b>       | <b>0,4064</b> |      |       |  |
| EVA            | 1           | 50,0   | 280    | 70,0   | 8,04  | 528,55             | 0,1134             | 3280                   | 1057,10              | 0,3963               | 0,587         | 2,62 | 0,519 | 28,881                                 |
|                | 2           | 50,1   |        | 70,1   | 8,07  | 550,45             | 0,1163             | 3291                   | 1100,90              | 0,4012               | 0,571         | 2,59 | 0,514 | 29,539                                 |
|                | 3           | 50,0   |        | 70,0   | 8,04  | 459,65             | 0,1108             | 2999                   | 919,30               | 0,4016               | 0,641         | 2,70 | 0,532 | 26,269                                 |
|                | <b>Ort.</b> |        |        |        |       |                    |                    |                        | <b>3190</b>          | <b>1025,77</b>       | <b>0,3997</b> |      |       |  |

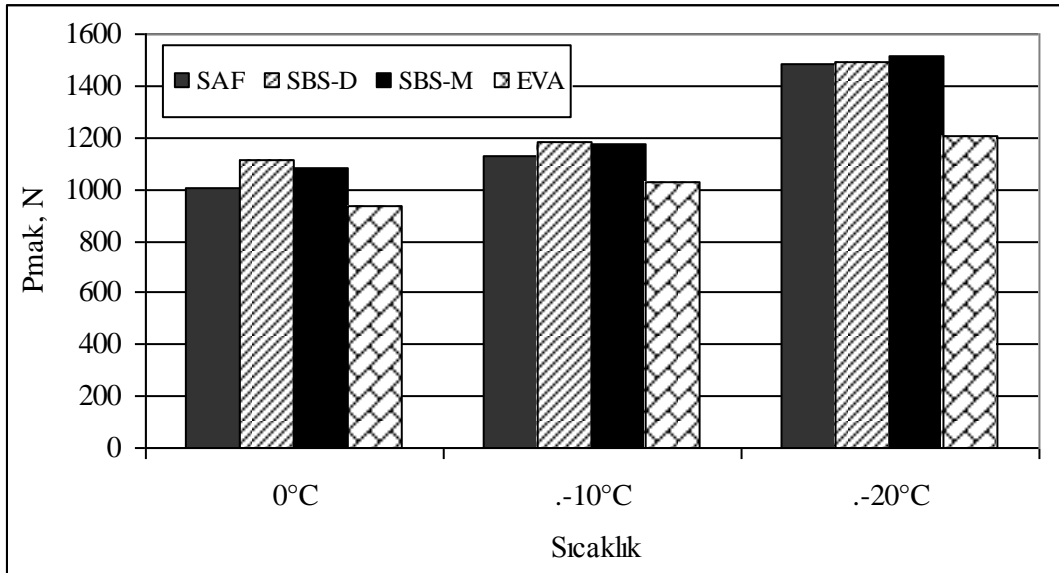
**Tablo 5.53.** Kiriş numunelere -20°C sıcaklıkta uygulanan LEKM deney sonuçları

| Bağlayıcı Türü | Numune No   | B (mm) | S (mm) | W (mm) | w (N) | P <sub>i</sub> (N) | δ <sub>i</sub> (%) | E (N/mm <sup>2</sup> ) | P <sub>max</sub> (N) | δ <sub>mak</sub> (%) | F(α)          | f(α) | α     | K <sub>IC</sub> (N/mm <sup>3/2</sup> ) |
|----------------|-------------|--------|--------|--------|-------|--------------------|--------------------|------------------------|----------------------|----------------------|---------------|------|-------|--|
| B<br>160/220   | 1           | 50,0   | 280    | 70,0   | 8,05  | 764,00             | 0,1152             | 4406                   | 1528,00              | 0,3855               | 0,509         | 2,50 | 0,497 | 38,843                                 |
|                | 2           | 50,1   |        | 70,0   | 8,07  | 743,75             | 0,1059             | 4674                   | 1487,50              | 0,3922               | 0,594         | 2,63 | 0,520 | 40,653                                 |
|                | 3           | 50,0   |        | 70,1   | 8,06  | 715,55             | 0,1127             | 4243                   | 1431,10              | 0,3892               | 0,540         | 2,54 | 0,506 | 37,366                                 |
|                | <b>Ort.</b> |        |        |        |       |                    |                    |                        | <b>4441</b>          | <b>1482,20</b>       | <b>0,3890</b> |      |       |  |
| SBS-D          | 1           | 50,0   | 280    | 70,0   | 8,01  | 737,25             | 0,1153             | 4266                   | 1474,50              | 0,3980               | 0,536         | 2,54 | 0,505 | 38,432                                 |
|                | 2           | 50,0   |        | 70,0   | 8,01  | 727,80             | 0,1058             | 4597                   | 1455,60              | 0,3961               | 0,605         | 2,64 | 0,523 | 40,225                                 |
|                | 3           | 50,1   |        | 70,0   | 8,03  | 771,20             | 0,1048             | 4871                   | 1542,40              | 0,3826               | 0,577         | 2,60 | 0,516 | 41,566                                 |
|                | <b>Ort.</b> |        |        |        |       |                    |                    |                        | <b>4578</b>          | <b>1490,83</b>       | <b>0,3922</b> |      |       |  |
| SBS-M          | 1           | 50,1   | 280    | 70,0   | 8,02  | 733,35             | 0,1061             | 4606                   | 1466,70              | 0,3863               | 0,580         | 2,61 | 0,517 | 39,642                                 |
|                | 2           | 50,1   |        | 70,1   | 8,04  | 764,00             | 0,1179             | 4281                   | 1528,00              | 0,3998               | 0,519         | 2,51 | 0,500 | 39,039                                 |
|                | 3           | 50,0   |        | 70,1   | 8,02  | 770,60             | 0,1141             | 4465                   | 1541,20              | 0,3932               | 0,531         | 2,53 | 0,503 | 39,868                                 |
|                | <b>Ort.</b> |        |        |        |       |                    |                    |                        | <b>4451</b>          | <b>1511,97</b>       | <b>0,3931</b> |      |       |  |
| EVA            | 1           | 50,1   | 280    | 70,0   | 8,06  | 611,30             | 0,1161             | 3608                   | 1222,60              | 0,3855               | 0,527         | 2,52 | 0,502 | 31,590                                 |
|                | 2           | 50,0   |        | 70,0   | 8,04  | 639,55             | 0,1038             | 4199                   | 1279,10              | 0,3872               | 0,618         | 2,66 | 0,526 | 35,754                                 |
|                | 3           | 50,0   |        | 70,1   | 8,05  | 562,95             | 0,0946             | 4129                   | 1125,90              | 0,3873               | 0,722         | 2,82 | 0,549 | 34,033                                 |
|                | <b>Ort.</b> |        |        |        |       |                    |                    |                        | <b>3978</b>          | <b>1209,20</b>       | <b>0,3867</b> |      |       |  |



Şekil 5.78. -20°C sıcaklıkta numunelerden elde edilen örnek yük – deformasyon eğrileri

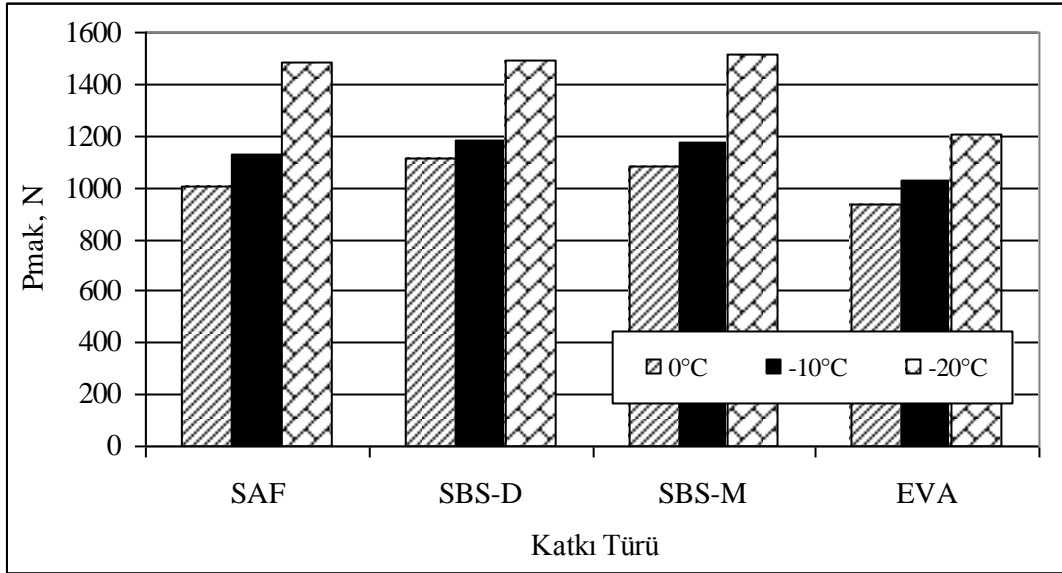
Karışımların maksimum yük ( $P_{mak}$ ) değerlerinin sıcaklıkla değişimi Şekil 5.79’da, katkı türü ile değişimi Şekil 5.80’de verilmektedir.



Şekil 5.79. Maksimum yük ( $P_{mak}$ ) değerlerinin sıcaklıkla ilişkisi

Şekil 5.79’da görüldüğü üzere SCB numunelerinde olduğu gibi kiriş numunelerinde de sıcaklık azaldıkça maksimum yük değerleri artmış ve bütün sıcaklıklarda en düşük  $P_{mak}$  değerine EVA modifiyeli bitüm kullanılarak hazırlanan karışımların sahip olduğu

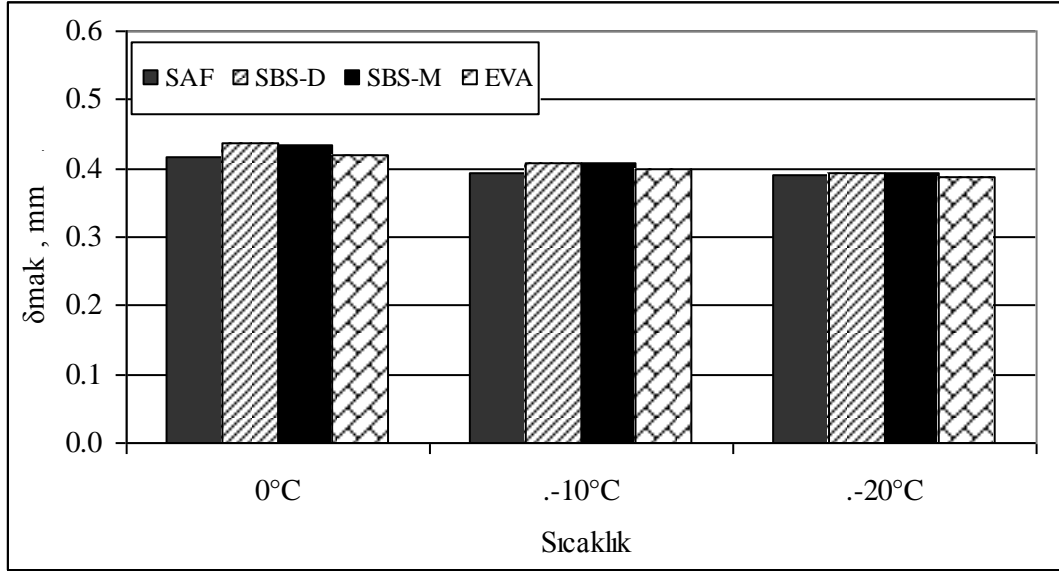
belirlenmiştir. En yüksek değere ise 0°C ve -10°C sıcaklıkta SBS-D modifiye bitümü kullanılarak hazırlanan karışımların, -20°C sıcaklıklarda ise SBS-M modifiye bitümü kullanılarak hazırlanan karışımların sahip olduğu tespit edilmiştir. 0°C ve -10°C sıcaklıklarda SBS-D modifiye bitümü ile hazırlanan karışımların  $P_{mak}$  değerlerinin EVA modifiyeli bağlayıcı kullanılarak hazırlanan karışımların bu değerlerinden sırasıyla %18,9 ve %15,4 oranlarında yüksek olduğu tespit edilmiştir. -20°C sıcaklıkta ise en yüksek  $P_{mak}$  değerine sahip olan SBS-M modifiye bitümü kullanılarak hazırlanan karışımın bu değerinin en düşük değere sahip olan EVA modifiye bitümü kullanılarak hazırlanan karışıma göre %25,0 oranında yüksek olduğu belirlenmiştir.



Şekil 5.80. Maksimum yük ( $P_{mak}$ ) değerlerinin katkı türü ile ilişkisi

Şekil 5.80'de görüldüğü üzere sıcaklığın -10°C'den -20°C'ye düşmesiyle  $P_{mak}$  değerlerinde önemli oranda artış meydana gelmiştir. Sıcaklığın 0°C'den -10°C'ye düşmesiyle B 160/220 bitümü, %4 oranında SBS-D, SBS-M ve EVA kullanılarak hazırlanan modifiye bitümler içeren karışımlarda  $P_{mak}$  değerleri sırasıyla %12,6, %6,5, %8,9 ve %9,7 oranlarında artmıştır. B 160/220 bitümü, %4 oranında SBS-D, SBS-M ve EVA kullanılarak hazırlanan modifiye bitümler içeren karışımlarda sıcaklığın -10°C'den -20°C'ye düşmesiyle  $P_{mak}$  değeri sırasıyla %31,2, %26,0, %28,3 ve %17,9 oranlarında artmıştır. Bu durum  $P_{mak}$  değerleri açısından sıcaklıktan en fazla etkilenen karışımın B 160/220 bitümü kullanılarak hazırlanan karışım olduğunu göstermektedir. Maksimum

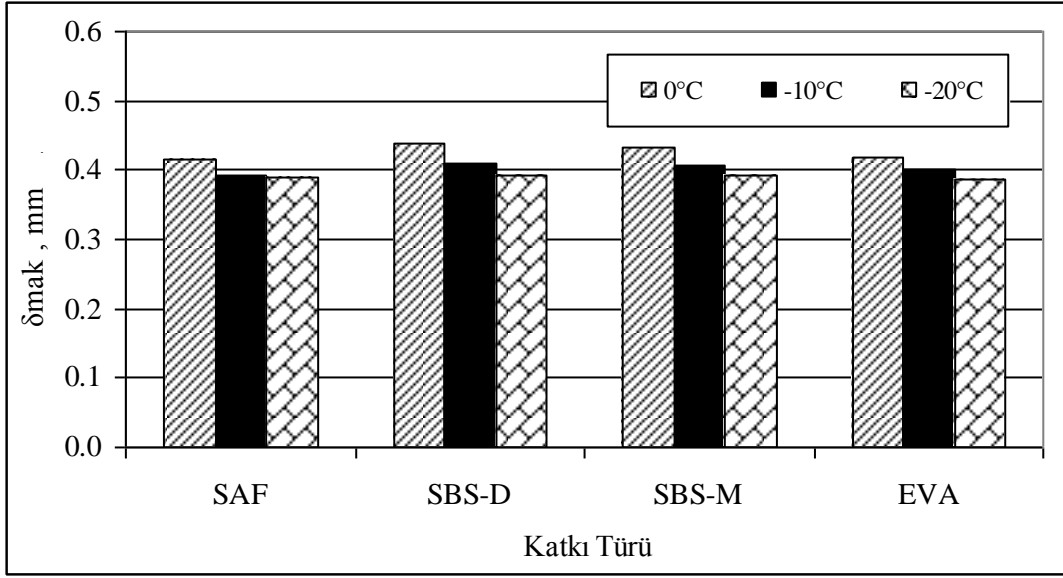
yükteki deformasyon ( $\delta_{mak}$ ) değerlerinin sıcaklıkla değişimi Şekil 5.81’de, katkı türü ile değişimi Şekil 5.82’de verilmiştir.



Şekil 5.81. Maksimum yükteki deformasyon ( $\delta_{mak}$ ) değerlerinin sıcaklıkla ilişkisi

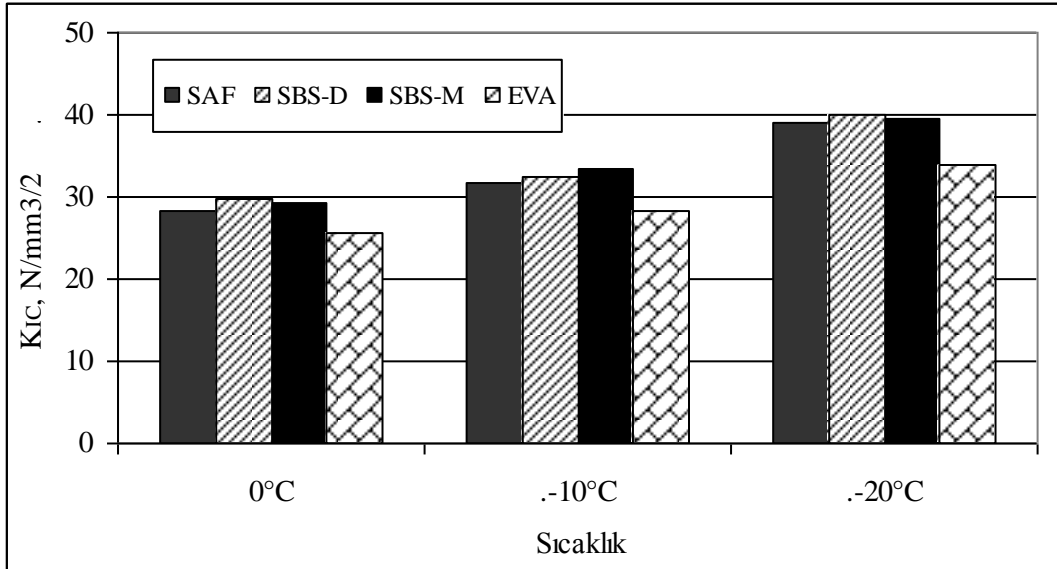
Şekil 5.81’de görüldüğü üzere 0°C sıcaklıkta en yüksek  $\delta_{mak}$  değerine SBS-D modifiye bitümü kullanılarak hazırlanan karışımın, -10°C ve -20°C sıcaklıklarda ise SBS-D ve SBS-M modifiye bitümü kullanılarak hazırlanan karışımların sahip olduğu belirlenmiştir. 0°C ve -20°C sıcaklıklarda saf bağlayıcı ve EVA modifiye bitümü kullanılarak hazırlanan karışımların  $\delta_{mak}$  değerlerinin birbirine yakın olduğu belirlenmiştir. -10°C’de SBS-D ve SBS-M modifiye bitümü kullanılarak hazırlanan karışımların  $\delta_{mak}$  değerlerinin saf karışıma göre %4.0 ve %3.3 oranlarında yüksek olduğu tespit edilmiştir.

Şekil 5.82’de görüldüğü üzere sıcaklıktaki düşüş ile  $\delta_{mak}$  değerleri düzenli olarak azalmıştır. Sıcaklığın 0°C’den -10°C’ye düşmesi ile  $\delta_{mak}$  değeri en fazla SBS-D modifiye bitümü kullanılarak hazırlanan karışımlarda (%7,0), en az ise EVA modifiye bitümü kullanılarak hazırlanan karışımlarda (%4,8) azalmıştır. Sıcaklığın 0°C’den -20°C’ye düşmesi ile  $\delta_{mak}$  değerlerindeki en yüksek değişim SBS-D modifiye bitümü kullanılarak hazırlanan karışımlarda gözlenirken en az değişim saf bağlayıcı kullanılarak hazırlanan karışımlarda (%7,1) gözlenmiştir.



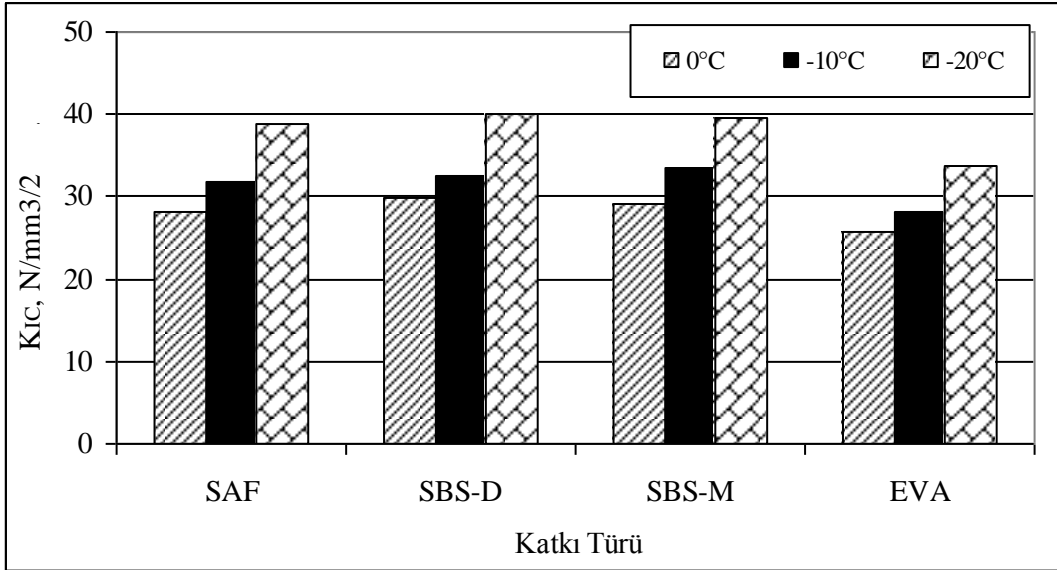
Şekil 5.82. Maksimum yükteki deformasyon ( $\delta_{mak}$ ) değerlerinin katkı türü ile ilişkisi

Elde edilen sonuçlardan her ne kadar  $P_{mak}$  değerleri bakımından sıcaklıktaki değişimden en fazla etkilenen karışım saf bağlayıcı içeren karışımlar olsa da bu karışımların  $\delta_{mak}$  değerlerinin sıcaklıktan diğer karışımlara kıyasla en az oranda etkilendiği söylenebilmektedir. Kırılma tokluğu ( $K_{IC}$ ) değerlerinin sıcaklıkla değişimi Şekil 5.83'te, katkı türü ile değişimi ise Şekil 5.84'de verilmiştir.



Şekil 5.83. Kırılma tokluğu ( $K_{IC}$ ) değerlerinin sıcaklıkla ilişkisi

Şekil 5.83’de görüldüğü üzere elastomer türü SBS türleri kullanımı ile saf karışıma göre her sıcaklıkta  $K_{IC}$  değerleri artarken plastomer türü EVA kullanımı ile bu değer azalmıştır.  $0^{\circ}C$  ve  $-20^{\circ}C$  sıcaklıklarda en yüksek  $K_{IC}$  değerine SBS-D modifiye bitümü kullanılarak hazırlanan karışımlar sahip olurken,  $-10^{\circ}C$  sıcaklıkta en yüksek değere SBS-M modifiye bitümü kullanılarak hazırlanan karışımların sahip olduğu tespit edilmiştir.  $0^{\circ}C$  ve  $-20^{\circ}C$  sıcaklarda SBS-D modifiye bitümü kullanılarak hazırlanan karışımların  $K_{IC}$  değerinin EVA modifiye bitümü kullanılarak hazırlanan karışımlara göre sırasıyla %15,8 ve %18,6 oranlarında yüksek olduğu belirlenmiştir.  $-10^{\circ}C$  sıcaklıkta SBS-M modifiye bitümü kullanılarak hazırlanan karışımların  $K_{IC}$  değerinin EVA modifiye bitümü kullanılarak hazırlanan karışıma göre %18,5 daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.



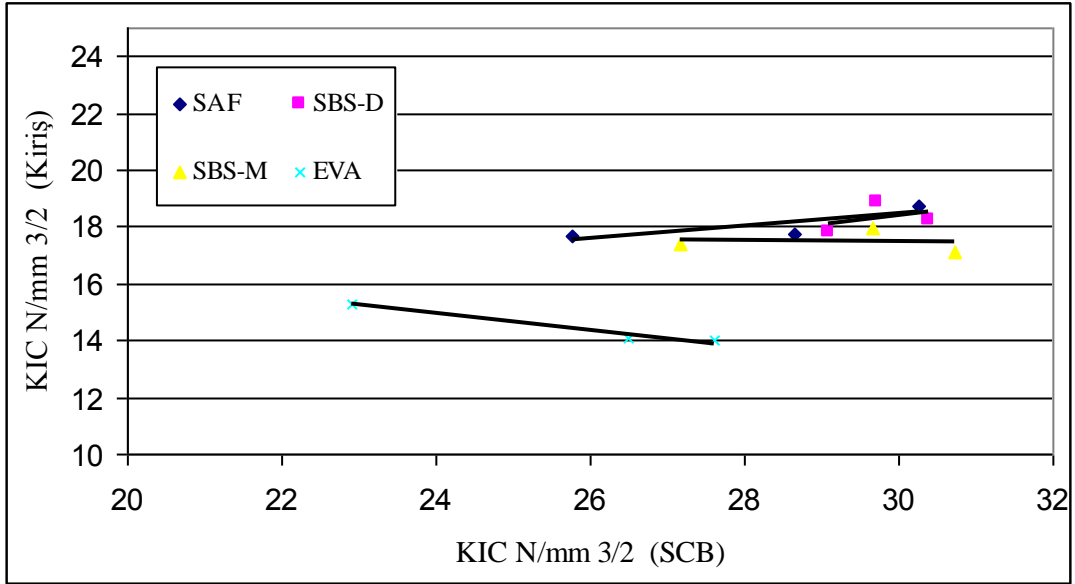
Şekil 5.84. Kırılma tokluğu ( $K_{IC}$ ) değerlerinin katkı türü ile ilişkisi

Şekil 5.84’te görüldüğü üzere sıcaklık azaldıkça  $K_{IC}$  değerleri düzenli olarak artmaktadır. B 160/220, %4 oranında SBS-D, SBS-M ve EVA içeren modifiye bitümleri kullanılarak hazırlanan karışımların  $K_{IC}$  değeri sıcaklığın  $0^{\circ}C$ ’den  $-10^{\circ}C$ ’ye düşmesiyle sırasıyla %12.5, %9.1, %14.6 ve %10.0 oranlarında artmıştır. Sıcaklığın  $0^{\circ}C$ ’den  $-20^{\circ}C$ ’ye düşmesiyle ise  $K_{IC}$  değerleri sırasıyla %38.0, %34.8, %35.4 ve %31.6 oranlarında artmıştır.



### 5.10.3. LEKM Deneylerinin Karşılaştırılması

Çalışmada hem yarım daire (SCB) hem de kiriş numuneler üzerinde LEKM prensiplerine uygun olarak kırılma mekaniği deneyleri uygulanmıştır. Her iki deneyden de farklı sıcaklıklarda kırılma tokluğu ( $K_{IC}$ ) değerleri hesaplanmıştır. Bulunan bu değerlerin arasındaki lineer ilişkiyi ve bu ilişkinin kuvvetini belirlemek amacıyla her bir karışım türünün aynı sıcaklıktaki  $K_{IC}$  değerlerinin belirtme katsayıları ve denklemleri belirlenmiştir. Kiriş numuneler ve yarım daire numunelerin  $0^{\circ}\text{C}$  sıcaklıktaki ilişkileri örnek olarak Şekil 5.85'te verilmiştir.

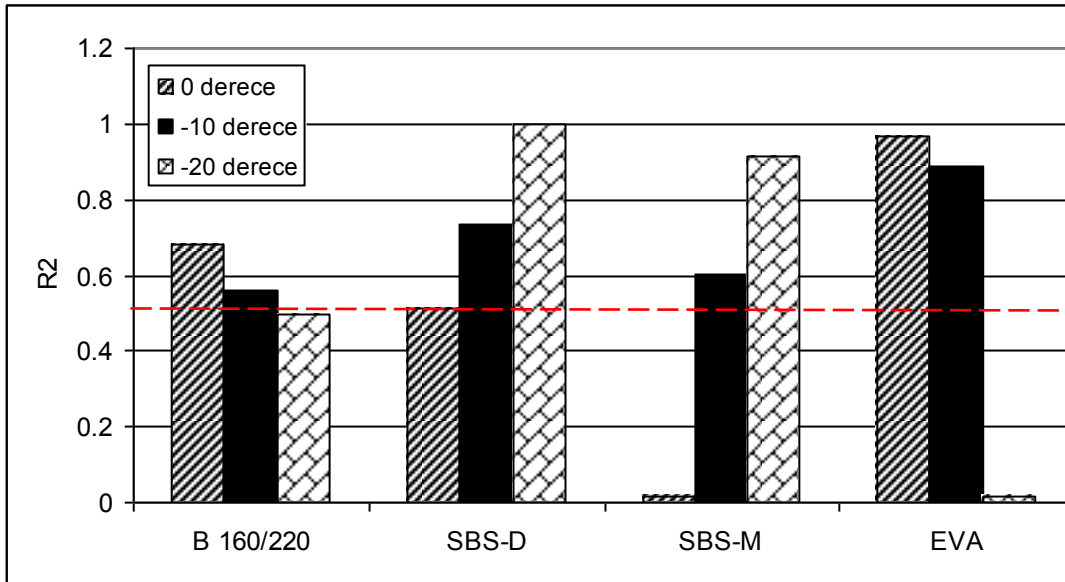


Şekil 5.85.  $0^{\circ}\text{C}$  sıcaklıkta yarım daire ve kiriş numuneler arasındaki ilişki

Elde edilen denklemler ve belirtme katsayıları Tablo 5.54'de verilmiştir. Belirtme katsayıları ayrıca Şekil 5.86'da verilmiştir.

**Tablo 5.54.** Karışımların  $K_{IC}$  değerlerinin denklemleri ve belirtme katsayıları

| Bağlayıcı Türü | Sıcaklık (°C) | Denklem                 | $R^2$  |
|----------------|---------------|-------------------------|--------|
| B 160/220      | 0             | $y = 0,2199x + 11,859$  | 0,6816 |
|                | -10           | $y = 0,1059x + 18,844$  | 0,5580 |
|                | -20           | $y = 0,3996x + 7,5269$  | 0,4948 |
| SBS-D          | 0             | $y = 0,2199x + 11,859$  | 0,5160 |
|                | -10           | $y = 0,179x + 15,86$    | 0,7374 |
|                | -20           | $y = -0,3464x + 37,447$ | 0,9986 |
| SBS-M          | 0             | $y = -0,0318x + 18,417$ | 0,0166 |
|                | -10           | $y = -0,3365x + 34,7$   | 0,6044 |
|                | -20           | $y = 1,7795x - 46,555$  | 0,9161 |
| EVA            | 0             | $y = -0,2931x + 21,992$ | 0,9698 |
|                | -10           | $y = -0,2882x + 28,025$ | 0,8875 |
|                | -20           | $y = -0,0083x + 20,813$ | 0,0135 |



**Şekil 5.86.** Karışımların  $K_{IC}$  değerlerinin farklı sıcaklıklardaki  $R^2$  değerleri

Şekil 5.86’da görüldüğü üzere sadece 0°C sıcaklıkta SBS-M modifiye bitümü kullanılarak hazırlanan karışımın ve -20°C sıcaklıkta EVA modifiye bitümü kullanılarak hazırlanan karışımın  $R^2$  değeri düşük çıkmıştır. Dolayısıyla iki deneyle belirlenen  $K_{IC}$  değerleri arasında genel bir lineer ilişki bulunduğu belirlenen  $R^2$  değerlerinden yola çıkılarak söylenebilmektedir.

## 6. SONUÇLAR

Çalışmada iki farklı elastomer sınıfı stiren-butadien-stirenin (SBS-D 1101 ve SBS-MD 243) ve plastomer sınıfı etilen vinil asetatın (EVA) bitümlü bağlayıcı ve karışımların mühendislik özellikleri üzerindeki etkileri geniş bir aralıkta incelenmiştir. Öncelikle her bir katkı maddesi %2-5 aralığında 4 farklı oranda bitüme ilave edilmiş, bu bağlayıcılar üzerinde geleneksel ve Superpave bağlayıcı deneyleri uygulanmıştır. Bütün katkıların penetrasyon değerini azalttığı, yumuşama noktası ve viskozite değerini arttırdığı tespit edilmiştir.

Malatya Meteoroloji Bölge Müdürlüğü'nden alınan son 22 yılın sıcaklık verileri değerlendirilerek uygulama bölgesi olarak seçilen Malatya ili için uygun bağlayıcı performans seviyesinin PG 70–22 olduğu belirlenmiştir. Katkı türlerini daha kolay bir şekilde kıyaslayabilmek amacıyla aynı katkı oranının kullanılması düşünülmüş ve bütün katkılardan bitüm ağırlığının %4'ü oranında kullanılmasına karar verilmiştir. Bitüm ağırlığınca %4 SBS-D ve SBS-M içeren modifiye bitümlerin performans seviyelerinin PG 70-34, %4 EVA içeren modifiye bitümün performans seviyesinin ise PG 70-28 olduğu belirlenmiştir.

B 160/220 saf bitümü ve %4 oranında SBS-D, SBS-M ve EVA içeren modifiye bitümler kullanılarak karışım numuneleri hazırlanmıştır. Karışım tasarımı Superpave sistemine göre yapılmış ve katkı kullanımı ile dizayn bitüm içeriğinin arttığı tespit edilmiştir. Dizayn bitüm içeriğinde yoğurmalı pres kullanılarak hazırlanan karışım numuneleri üzerinde uygulanan Marshall stabilite ve akma deneyleri sonucunda en yüksek stabilite değerine SBS-D, en düşük akma değerine ise EVA modifiyeli bitüm kullanılarak hazırlanan karışımların sahip olduğu tespit edilmiştir. En yüksek kalıcı Marshall stabilitesi değerine ise SBS-M ve EVA modifiyeli bitümleri kullanılarak hazırlanan karışımların sahip olduğu tespit edilmiştir.

Nem hasarına karşı dayanımın bir göstergesi olan çekme dayanımı oranı deneyleri sonucunda polimer modifiyeli bağlayıcılarla hazırlanan karışımların çekme dayanımı ve çekme dayanımı oranı değerlerinin saf bağlayıcı ile hazırlanan karışımlardan yüksek olduğu belirlenmiştir. Tokluk indeksi değerlerinden SBS-M modifiyeli bağlayıcılarla hazırlanan karışımların en fazla, EVA modifiyeli bitümlerle hazırlanan karışımların en az elastik davranış sergilediği tespit edilmiştir.

İndirekt çekme rijitlik modülü deneyleri sonucunda katkı kullanımı ile bu değerlerin arttığı, en yüksek ve en düşük ITSM değerlerine sırasıyla EVA modifiye bitümü ve B 160/220 saf bitümü kullanılarak hazırlanan karışımların sahip olduğu tespit edilmiştir.

Katkı kullanımı ile karışımların yorulma ömürleri önemli oranda artmıştır. Yorulma ömür değerleri ITSM değerleriyle paralellik göstermiş, en yüksek değere EVA modifiyeli bitüm, en düşük değere ise B 160/220 içeren karışımların sahip olduğu tespit edilmiştir. EVA modifiyeli bitüm kullanımı ile maksimum deformasyon değerleri azalmış dolayısıyla bu karışımlar daha sünek davranış sergilemişlerdir.

Karışımların çatlak ilerlemesine karşı dayanımları LEKM prensiplerine uygun olarak üç farklı sıcaklıkta (0°C, -10°C ve -20°C) iki farklı geometriye (yarım daire ve kiriş) sahip numuneler üzerinde uygulanan deneyler ile belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlardan çatlak ilerlemesine karşı dayanımı en yüksek olan karışımın deney türü ve sıcaklığa bağlı olarak B 160/220 saf bitümü, SBS-D ve SBS-M modifiyeli bitümleri kullanılarak hazırlanan karışımlar arasında değiştiği tespit edilmiştir. Çatlak ilerleyişine karşı dayanımı en düşük olan karışımın ise bütün sıcaklıklarda ve her iki deney yönteminde de EVA modifiyeli bitüm içeren bağlayıcılarla hazırlanan karışımlar olduğu tespit edilmiştir.

Bütün sonuçlar değerlendirildiğinde katkı kullanımı ile Stabilite, nem hasarına karşı dayanım, yorulma dayanımlarının artacağı, SBS türü katkı maddeleri kullanımı ile çatlak ilerleyişine karşı dayanım artarken EVA türü katkı kullanımı ile bu dayanımın azalacağı söylenebilmektedir. Ayrıca yeni bir stiren-butadien-stiren türü olan SBS MD243 kullanımı ile viskozite değerleri düşük olduğu için daha az enerjiyle bitümlü karışımlar üzerinde SBS D1101 ile benzer etkinin sağlanabileceği de belirlenmiştir.

## KAYNAKLAR

- [1] **Tunç, A.**, 2004. Esnek Kaplama Malzemeleri El Kitabı, Asil Yayın Dağıtım, 352 s, Ankara.
- [2] **Yılmaz, M.**, 2005. Polyester Reçinenin Bitüm ve Bitümlü Sıcak Karışımlar Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması, *Yüksek Lisans Tezi*, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [3] **Tunç, A.**, 2007. Yol Malzemeleri ve Uygulamaları, Asil Yayın Dağıtım, Ankara, 840 s, Ankara.
- [4] **Kaşak, S., Orhan, F., Eribol, S., Güngör, A.G.**, 2004, Yeni Bitüm Standardı, *4.Ulusal Asfalt Sempozyumu*, K.G.M., Ankara, s. 405-413.
- [5] **Francken, L.**, 1998. Bituminous Binders and Mixes, Rilem Reports, E & FN Spon, 352 p., London and New York.
- [6] **Lu, X., Isacson, U.**, 2000. Laboratory Study on the Low Temperature Physical Hardening of Conventional and Polymer Modified Bitumens, *Construction and Building Materials*, **14**, 79-88.
- [7] **Navarro, F.J., Partal, P., Martínez-Boza, F., Valencia, C., Gallegos, C.**, 2002. Rheological Characteristics of Ground Tire Rubber-Modified Bitumens, *Chemical Engineering Journal*, **89**, 53-61.
- [8] **Airey, G.D.**, 2003. Rheological Properties of Styrene Butadiene Styrene Polymer Modified Road Bitumens, *Fuel*, **82 (14)**, 1709-1719.
- [9] **Aglan, H., Othman, A., Figueroa, L., Rollings, R.**, 1993. Effect of Styrene-Butadiene- Styrene Block Copolymer on Fatigue Crack Propagation Behavior of Asphalt Concrete Mixtures, *Transportation Research Record*, **1417**, 178-186.
- [10] **Khattak, M.J., Baladi, G.Y.**, 1998. Engineering Properties of Polymer – Modified Asphalt Mixtures, *Transportation Research Record*, **1638**, 12-22.
- [11] **Whiteoak, D. ve Read, J.**, 2003. The Shell Bitumen Handbook, Thomas Telford Ltd., 464 p., London.
- [12] **Airey, G.D.**, 2002. Rheological Evaluation of Ethylene Vinyl Acetate Polymer Modified Bitumens, *Construction and Building Materials*, **16**, 473-487.
- [13] **Downes, J.W.**, 1986. Modified Binders to the Year 2000, *6th International Asphalt Conference*, Sidney, Australian, pp. 35-39.
- [14] **Nolan, K.L., Hesp Simon, A.M.**, 1994. Low-Temperature Fracture Toughness of Polyethylene Modified Asphalt Binders, *Transportation Research Record* **1417**, 54-59.

- [15] **Asphalt Institute**, 1996. Superpave Mix Design, Superpave Series No. 2 (SP-2), 128 p., USA.
- [16] **Ahmedzade, P., Yilmaz, M.**, 2007. Stiren-Butadien-Stiren Modifikasyonunun Bitümlü Bağlayıcıların Isı Duyarlılığı, Rijitlik ve Yaslanma Özellikleri Üzerindeki Etkisi, *SDÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, **11 (3)**, 232-238.
- [17] **TS EN 12607-1**, 2003. Bitümler ve Bitümlü Bağlayıcılar – Sıcaklık ve Havanın Etkisiyle Sertleşmeye Karşı Direncin Tayini – Bölüm 1: RTFOT (Etüvde Hareket Halinde İnce Film Deneyi) Yöntemi, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [18] **Mull, M.A., Stuart, K., Yehia, A.**, 2002. Fracture Resistance Characterization of Chemically Modified Crumb Rubber Asphalt Pavements, *Journal of Material Science*, **37**, 557-566.
- [19] **Vukosavljevic, D.**, 2006. Fatigue Characterization of Field HMA Surface Mixtures Containing Recycled Asphalt Pavement (RAP), *Master Thesis*, The University of Tennessee, Knoxville.
- [20] **Birgisson, B., Montepara, A., Romeo, E., Roncella R., Napier, J.A.L., Tebaldi G.**, 2008. Determination and Prediction of Crack Patterns in Hot Mix Asphalt (HMA) Mixtures, *Engineering Fracture Mechanism*, **75**, 664-673.
- [21] **Kabir, S.**, 2008. Effect of Hydrated Lime on the Laboratory Performance of Superpave Mixtures, *Master Thesis*, Khulna University of Engineering and Technology, Bangladesh.
- [22] **Kim, H., Wagoner, M.P., Buttlar, W.G.**, 2008. Micromechanical Fracture Modeling of Asphalt Concrete Using a Single-Edge Notched Beam Test, *Materials and Structures*, RILEM.
- [23] **Tunay, C.**, 2008. Dekoratif Kaplama Sistemlerinde Asfalt Kullanımı ve Alternatif Yöntemler ile Teknik-Ekonomik Yönden Karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [24] **Uluçaylı, M.**, 2002. Asfalt El Kitabı, İstanbul Büyükşehir Belediyesi, İSFALT Bilimsel Yayın No:2, 573 s., İstanbul.
- [25] **Umar, F., Açar, E.**, 1991. Yol Üstyapısı, İstanbul Teknik Üniversitesi Matbaası, 339 s., İstanbul.
- [26] **Kurtis, K.**, 2003. Asphalt and Asphalt Concrete, Scholl of Civil Engineering Georgia Institute Technology, pp. 14-18, Atlanta, Georgia USA.
- [27] **Tosun, N.** Bitümlü Kaplamalar Uygulama Kitabı, [http://www.armatmuhendislik.com/izolasyon\\_ve\\_yalitim/Bitumlu\\_kaplamalar\\_uygulama\\_kitabi\\_Yazan\\_Necd\\_et\\_Tosun.pdf](http://www.armatmuhendislik.com/izolasyon_ve_yalitim/Bitumlu_kaplamalar_uygulama_kitabi_Yazan_Necd_et_Tosun.pdf), İnternet Erişim Tarihi: 22.03.2013.

- [28] **Lav, A.H. ve Lav, M.A.**, 2004. Shell Bitüm El Kitabı, İSFALT Bilimsel Yayınları, No:3, 334 s., İstanbul.
- [29] **Kandhall, P.S., Mallick, R.B.**, 1997. Aggregate Tests for Hot Mix Asphalt: State of Practice, **NCAT Report** No.97-6, pp. 10-15., Alabama, USA.
- [30] **Roberts F.L., Mohammad L.N., Wang L. B.**, 2002. History of Hot Mix Asphalt Mixture Design in the United States, *American Society of Civil Engineers, Journal of Materials in Civil Engineering*, **14 (4)**, 279-293.
- [31] **KTŞ**, 2006. Karayolları Teknik Şartnamesi, Karayolları Genel Müdürlüğü Yayınları, 435 s., Ankara.
- [32] **Lavin, P.G.**, 2003. Asphalt Pavements, E & FN Spon, 444 p., London and New York.
- [33] **Ilıcalı, M., Tayfur, S., Özen, H., Sönmez, İ., Eren, K.**, 2001. Asfalt ve Uygulamaları, İstanbul Büyükşehir Belediyesi, İSFALT Bilimsel Yayınları, No: 1, 280 s., İstanbul.
- [34] **Terzi, S.**, 2000. Mermer Toz Atıkların Asfalt Betonunda Filler Malzemesi Olarak Kullanılmasının Araştırılması, *Yüksek Lisans Tezi*, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- [35] **Balta, İ.**, 2004. Bitümlü Sıcak Karışımların Sudan Kaynaklanan Bozulmalara Karşı Duyarlılığı, *Yüksek Lisans Tezi*, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- [36] **Orhan, F.**, 2012. Bitümlü Karışımlar Laboratuvar Çalışmaları, Karayolları Genel Müdürlüğü, Araştırma Geliştirme Dairesi Başkanlığı, Üstyapı Geliştirme Şubesi Müdürlüğü, Ankara.
- [37] **URL-1**, <http://www.asnud.org.tr>, Erişim Tarihi: 22.03.2013.
- [38] **Sonmez, I., Deniz, M.T., Tayfur, S., Ozen, H., Yildirim, S.A., Eren, B.K.**. 2005. Effects of Modifiers on the Hot Mix Asphalt Performance, *6th transportation congress*, Istanbul, pp. 334-48.
- [39] **Huang, .YH.**, 2003. Pavement Analysis and Design. 2nd ed. Pearson Prentice Hall, 792 p., USA.
- [40] **Widyatmoko I, Elliott R.**, 2008. Characteristics of Elastomeric and Plastomeric Binders in Contact with Natural Asphalts, *Construction and Building Materials*, **22(3)**, 239-249.
- [41] **Hamidi, H.**, 1998. Stiffness Modulus and Permanent Deformation Characteristics of Asphalt Mix Containing Gilsonite, *Ms Thesis*, Bandung Technology Institute, Bandung, Indonesian.

- [42] **Liu, J., Li, P.**, 2008. Experimental Study on Gilsonite-Modified Asphalt. *2008 Airfield and Highway Pavement Specialty Conference*, Washington, pp. 222-228.
- [43] **Dikicioğlu, A.E.**, 2004. Ülkemizdeki Sathi Kaplamalı ve Sıcak Karışım Kaplamalı Yollarda Ömür-maliyet İlişkinine Genel Bakış, *4.Ulusal Asfalt Sempozyumu*, K.G.M., Ankara, s. 149-153.
- [44] **Çakıroğlu, M.**, 1996. Yol Esnek Üstyapıda Oluşan Bozulmalar, *1. Ulusal Asfalt Sempozyumu, İSFALT*, İstanbul, s.154-163.
- [45] **Bekheet, W., Helali, K., Kazmierowski, T., Ningyuan, L.**, 2005. Integration of Preventive Maintenance in the Pavement Preservation Program Ontario Experience, *Transportation Research Circular*, Roadway Pavement Preservation 2005, Kansas City, Missouri, pp. 87-98.
- [46] **Terzi, S., Karaşahin, M.**, 2004. Yapay Sinir Ağları Yöntemi ile Esnek Üstyapı Performans Tahmin Modeli Geliştirilmesi, *4. Ulusal Asfalt Sempozyumu*, K.G.M., Ankara, s. 344-357.
- [47] **Brown, E.R., Kandhal, P.S., Zhang, J.**, 2001. Performance Testing for Hot Mix Asphalt, *NCAT Report, 01-05*, Auburn, 79p.
- [48] **Verstraeten, J.**, 1995. Bituminous Materials with a High Resistance to Flow Rutting, PIARC Technical Committee on Flexible Roads, Belgium.
- [49] **Kutluhan, S.**, 2008. Bitümlü Sıcak Karışımlarda Tekerlek İzi Oluşumunun Modellenmesi, *Doktora Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [50] **Geçkil, T.**, 2008. Siyah Karbonun Bitümlü Sıcak Karışımların Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi, *Doktora Tezi*, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [51] **Said, S.F., Hakim H., Oscarsson E., Hjort, M.**, 2011. Prediction of Flow Rutting in Asphalt Concrete Layers, *International Journal of Pavement Engineering*, **12 (6)**, 519-532.
- [52] **Altaş, Ö.Y.**, 2002. Bitümlü Malzemeler ve Karışım Şartnamelerinin Karşılaştırılması, *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [53] **Karayolları Genel Müdürlüğü**, 2008. Karayolları Esnek Üstyapılar Projelendirme Rehberi, Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı, Üstyapı Şubesi Müdürlüğü.
- [54] **Yılmaz, M.**, 2011. Asfaltitin Bitümlü sıcak karışımların Mekanik Özellikleri Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi, *Doktora Tezi*, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.



- [55] **Şengöz, B.**, 2003. Asfalt Film Kalınlığının Bitümlü Karışımların Yaşlanmasına ve Suya Duyarlılığına Etkisi, *Doktora Tezi*, İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [56] **Kaşak, S.**, 2007. Taş Mastik Asfalt Karışımında Katkı Maddesi Olarak Fiber Yerine Diatomitin Kullanılabilirliğinin Araştırılması, *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [57] **Edwards, Y., Taşdemir, Y., Isacsson, U.**, 2006. Effects of Commercial Waxes on Asphalt Concrete Mixtures Performance at Low and Medium Temperatures, *Cold Regions and Science Technology*, **45 (1)**, 31-41.
- [58] **Roque, R., Birgisson, B., Tia, M., Nukunya, B.**, 2002. Evaluation of Superpave™ Criteria for VMA and Fine Aggregate Angularity, Final Report, **UF Project** No.: 4910-4504-619-12, University of Florida, 261p.
- [59] **Yıldırım, Y.**, 2007. Polymer Modified Binders, *Construction and Building Materials*, **21 (1)**, 66-72.
- [60] **Abbas, A.R.**, 2004. Simulation of the Micromechanical Behavior of Asphalt Mixtures Using the Discrete Element Method, *PhD Thesis*, Washington State University, USA.
- [61] **Birliker, R.Y.**, 1998. Bitümlü Karışımlara Eklenebilecek Katkıları ile Bu Tip Bitümlü Karışımların Davranışlarının Araştırılması ve Bir Yorulma Eğrisi Tahmin Modeli, *Doktora Tezi*, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [62] **Airey, G.**, 2006. Performance of Polymer Modified Bitumens: Emphasis on the UK Market, *Norwegian Asphalt Association Annual Conference*, Oslo, Norway.
- [63] **Fu, H., Xie, L., Dou, D., Li, L., Yu, M., Yao, S.**, 2007. Storage Stability and Compatibility of Asphalt Binder Modified by SBS Graft Copolymer, *Construction and Building Materials*, **21**, 1528–1533.
- [64] **Isacsson, U., Lu, X.**, 1995. Testing and Appraisal of Polymer Modified Road Bitumens-State of the Art, *Materials and Structure*, **28**, 139-159.
- [65] **Airey, G.D.**, 2003. Rheological Properties of Styrene Butadiene Styrene Polymer Modified Road Bitumens, *Fuel*, **82 (14)**, 1709-1719.
- [66] **Kara, Z.S., Vonk, W.**, 2009. Yeni Geliştirilmiş bir SBS Tipi ile Polimer Modifiye Bitümde (PMB) Performans Etkinliğinin Arttırılması, 18-19 Kasım, 5. *Ulusal Asfalt Sempozyumu ve Sergisi*, Ankara.
- [67] **Yılmaz, M., Ahmedzade P.** 2008. Saf ve SBS Modifiyeli Bitümlü Bağlayıcıların Kısa Dönem Yaşlanmadan sonraki Özelliklerinin İki Farklı Yaşlandırma

Yöntemi Kullanılarak İncelenmesi, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, **23 (3)**, 569-575.

- [68] **Doğan, M.**, 2006. Effect of Polymer Additives on the Physical Properties of Bitumen Based Composites, *PhD Thesis*, Middle East Technical University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Ankara.
- [69] **Kraton Polymers**, 1995. Preparing Blends of Kraton D Polymer and Bitumen, Shell Technical Bulletin.
- [70] **Kumar, P., Chandra, S., Bose, S.**, 2006. Strength Characteristics of Polymer Modified Mixes, *The International Journal of Pavement Engineering*, **7 (1)**, 63–71.
- [71] **Lu, X., Isacson, U.**, 1998. Effect of Filler on Low Temperature Physical Hardening of Bitumen, *Construction and Building Materials*, **12**, 463-470.
- [72] **Görkem, Ç., Sengoz, B.**, 2009. Predicting Stripping and Moisture Induced Damage of Asphalt Concrete Prepared with Polymer Modified Bitumen and Hydrated Lime, *Construction and Building Materials*, **23**, 2227-2236.
- [73] **AAPA**, 2004. Code of Practice: Manufacture, Storage and Handling of Polymer Modified Binders, *Australian Asphalt Pavement Association*, **CP:PMB-1**, 1st Edition.
- [74] **Scholten, E.J.**, 2010. Build Sustainable and Economical Roads with a Novel Class of SBS Polymers, Isfalt Seminar, İstanbul.
- [75] **Bahai, H.U, Hanson, D.I., Zeng, M., Zhai, H., Khatri, M.A., Anderson, R.M.**, 2001. Characterization of Modified Asphalt Binders in Superpave Mix Design, *National Cooperative Highway Research Program*, **NCHRP Report 459**, National Academy Press, Washington, USA.
- [76] **Şengöz, B., Gümüştekin, Ş., Topal, A., Işıkyakar, G.**, 2007. Polimer Modifiye Bitümlerle Elde Edilen Sıcak Karışımların Reolojik ve Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesinde Görüntü Analizi Yöntemlerinin Kullanılması, *Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu Araştırma Projesi*, TÜBİTAK Proje No: 104M559, İzmir.
- [77] **Nolan, K.L., Hesp Simon, A.M.**, 1994. Low-Temperature Fracture Toughness of Polyethylene Modified Asphalt Binders, **Transportation Research Record**, **1417**, 54-59.
- [78] **Topal, A.**, 2010. Evaluation of the Properties and Microstructure of Plastomeric Polymer Modified Bitumens, *Fuel Processing Technology*, **91**, 45-51.
- [79] **Sengoz, B., Isikyakar, G.**, 2009. Evaluation of the Properties and Microstructure of SBS and EVA Polymer Modified Bitumen, *Construction and Building Materials*, **22**, 1897-1905.

- [80] **Sengoz, B., Isikyakar, G.**, 2009. Analysis of Styrene-Butadiene-Styrene Polymer Modified Bitumen Using Fluorescent Microscopy and Conventional Test Methods, *Journal of Hazardous Materials*, **150**,424-432.
- [81] **Kraton Polymers**, Guidance for Blending of Kraton MD243 or Kraton MD246 into Bitumen, Shell Technical Bulletin.
- [82] **Scholten, E.J., Vonk. W., Korenstra, J.**, 2010. Towards green pavements with novel class of SBS polymers for enhanced effectiveness in bitumen and pavement performance, *International Journal Pavement Research Technology*, **3(4)**, 216-222.
- [83] **Vonk, W., Scholten, E.J., Korenstra, J.**, 2010. Novel class of SBS polymers for enhanced effectiveness in bitumen modification. *Australian Asphalt Paving Association Thirteenth International Flexible Pavements Conference*, Queensland, Australia.
- [84] **TS 118 EN 1426**, 2002. Bitümler ve Bitümlü Bağlayıcılar – İğne Batma Derinliği Tayini, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [85] **TS 120 EN 1427**, 2002. Bitümler ve Bitümlü Bağlayıcılar - Yumuşama Noktası Tayini – Halka ve Bilya Metodu, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [86] **Ullidtz, P.**, 1987. Pavement Analysis, Elsevier, pp. 318, Amsterdam.
- [87] **TS EN 12607–1**, 2003. Bitümler ve Bitümlü Bağlayıcılar – Sıcaklık ve Havanın Etkisiyle Sertleşmeye Karşı Direncin Tayini – Bölüm 1: RTFOT (Etüvde Hareket Halinde İnce Film Deneyi) Yöntemi, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [88] **Zaniewski, J.P. ve Pumphrey, M.E.**, 2004. Evaluation of Performance Graded Asphalt Binder Equipment and Testing Protocol, Asphalt Technology Program, p. 107, Morgantown, West Virginia.
- [89] **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. ve Sharma, M.G.**, 1994. Binder Characterization and Evaluation Volume 4: Test Methods, *Strategic Highway Research Program, SHRP A-370*, 197 p., National Research Council Washington, DC.
- [90] **McGennis, R.B., Anderson, R.M., Kennedy, T.W. ve Solaimanian, M.**, Background of Superpave Asphalt Mixture Design and Analysis, *U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration, FHWA-SA-95-003*, 172 p., Washington, DC.
- [91] **Orhan, F.**, 2000. Asfaltın Geleceği Superpave, *3.Ulusal Asfalt Sempozyumu*, K.G.M., Ankara, s. 146-160.

- [92] **AASHTO T209**, 1999. Bulk Specific Gravity of Bituminous Paving Mixtures, *American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO)*, Washington DC.
- [93] **URL-2**, <http://www.cshrp.org/products/brief-17.pdf> Superpave 2000 – Improved Standards for a New Millennium, Canadian Strategic Highway Research Program (C-SHRP), C-SHRP Technical Brief # 17, Ontario, 8p., Erişim Tarihi: 22.03.2013.
- [94] **Anderson, R.M. ve McGennis, R.B.**, 1994. Superpave Asphalt Mixture Design Illustrated Level 1 Lab Methods, *National Asphalt Training Center Demonstration Project 101, FHWA-SA-95-004*, 80 p., Asphalt Institute, Lexington, KY.
- [95] **AASHTO T166**, 1999. Bulk Specific Gravity of Compacted Bituminous Mixtures Using Saturated Surface-Dry Specimens, *American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO)*, Washington DC.
- [96] **TS EN 12697-34+A1**, 2007. Bitümlü Karışımlar - Sıcak Asfalt Karışımları İçin Deney Yöntemleri - Bölüm 34: Marshall deneyi, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [97] **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.
- [98] **Hınışlıoğlu, S. ve Ağar, E.**, 2004. Use of the Waste High Density Polyethylene as Bitumen Modifier in Asphalt Concrete Mix, *Materials Letters*, **58**, 267-271.
- [99] **Çolak, K.M.**, 2006. Asfalt Kaplamalarda Sinerjetik Fayda Konusunun Anlaşılmasında Marshall Oranı Yaklaşımının Kullanılması, *Yüksek Lisans Tezi*, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- [100] **Yılmaz, M. ve Kök, B.V.**, 2009. Effects of Ferrochromium Slag with Neat and Polymer Modified Binders in Hot Bituminous Mix, *Indian Journal of Engineering & Materials Sciences*, **16** (5), 310-318.
- [101] **Aksoy, A., Şamlıoğlu, K., Tayfur, S. ve Özen, H.**, 2005. Effects of Various Additives on the Moisture Damage Sensitivity of Asphalt Mixtures, *Construction and Building Materials*, **19** (1), 11-18.
- [102] **URL-3**, [http://94.236.30.88/NR/rdonlyres/148F36FE-CFA1-4011-8749-0A4A90EB75E1/0/spec\\_132009.pdf](http://94.236.30.88/NR/rdonlyres/148F36FE-CFA1-4011-8749-0A4A90EB75E1/0/spec_132009.pdf) Marshall Asphalt for Airfields, Ministry of Defence, Construction Support Team, England, Specification 13, 73 p., Erişim Tarihi: 22.03.2013.

- [103] **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.
- [104] **Shu, X., Huang B. ve Vukosavljevic, D.**, 2008. Laboratory Evaluation of Fatigue Characteristics of Recycled Asphalt Mixtures, *Construction and Building Materials*, **22**, 1323-1330.
- [105] **Kök, B.V.**, 2007. Bitümlü Sıcak Karışımların Üretiminde Yeni bir Karıştırma Yönteminin Araştırılması, *Doktora Tezi*, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [106] **BS DD 213**, 1993. Method for Determination of the Indirect Tensile Stiffness Modulus of Bituminous Mixtures, *British Standards Institution*, London
- [107] **Ghile, D.B.**, 2006. Effects of Nanoclay Modification on Rheology of Bitumen and on Performance of Asphalt Mixtures, *MSc Thesis*, Delfth University of Technology, Delfth.
- [108] **Molenaar, A.A.A. ve Medani, T.O.**, 2000. Rational Testing Methods for Performance Based Specifications, *Proceedings of the 1st International Conference World of Asphalt Pavements*, Sydney, Australia, July 7-10, 484-500.
- [109] **Simms, S.A.**, 1998. Use of Coal Fly Ash in Asphalt Concrete Mixes, *MSc Thesis*, Dalhousie University, Daltech, Canada.
- [110] **TS EN 12697-24+A1**, 2004. Bitümlü Karışımlar - Sıcak Asfalt Karışımları İçin Deney Yöntemleri - Bölüm 24: Yorulma Direnci, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [111] **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.
- [112] **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.
- [113] **Hınışoğlu, S., ve Hattatoğlu, F.**, 2003. Asfalt Betonunun Yorulma Ömrünün Üç Boyutlu Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Tahmin Edilmesi, *TÜBİTAK Projesi*, Erzurum.
- [114] **Jajliardo, A.P.**, 2003. Development of Specification Criteria to Mitigate Top-Down Cracking, *Ms Thesis*, University of Florida, Florida.

- [115] **Garcia, O. F.**, 2002. Asphalt Mixture and Loading Effects on Surface-Cracking of Pavements, *Ms Thesis*, University of Florida, Florida.
- [116] **Özdemir, A.**, 2006. Seramik Malzemelerin kırılma Tokluğu Değerlerinin Üç Boyutlu Sonlu elemanlar Yöntemi ile Teorik Olarak Belirlenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- [117] **Alyamaç, K.E.**, 2008. Kendiliğinden Yerleşen Betonun Lineer Olmayan Kırılma Mekaniği Prensipleriyle İncelenmesi, *Doktora Tezi*, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [118] **Hajj, E.Y., Sebaaly, P.E. ve Loria, L.**, 2008. Reflective Cracking of Flexible Pavements Phase II: Review of Analysis Models and Evaluation Tests, Nevada Department of Transportation, **Research Report No. 13JF-1**, 87 pp., Carson City, Nevada.
- [119] **Molenaar, J.M.M.**, 2003. Performance Related Characterisation of the Mechanical Behaviour of Asphalt Mixtures, Dienst Weg- en Waterbouwkunde, Rijkswaterstaat Road and Hydraulic Engineering Institute, 396 pp., Delfth, Netherlands.
- [120] **Wagoner, M.P., Butlar, W.G. ve Paulino, G.H.**, 2005. Disk-shaped Compact Tension Test for Asphalt Concrete Fracture, *Society for Experimental Mechanics*, **45** (3), 270-277.
- [121] **Huang, B., Shu, X. ve Tang, Y.**, 2005. Comparison of Semi-Circular Bending and Indirect Tensile Strength Tests for HMA Mixtures, *Geo-Frontiers 2005, Advances in Pavement Engineering*, **GSP 130**, 155-169.
- [122] **Marasteanu, M.O., Li, X., Clyne, T.R., Voller, V.R., Timm, D.H. ve Newcomb, D.E.**, 2004. Low Temperature Cracking of Asphalt Concrete Pavements, *Minnesota Department of Transportation, MN/RC – 2004-23*, 229 p., Minnesota.
- [123] **Lim, I.L., Johnston, I.W. ve Choi, S.K.**, 1993. Stress Intensity Factors for Semi-Circular Specimens Under Three-Point Bending, *Engineering Fracture Mechanics*, **44** (3), 363-382.
- [124] **Hoffman, R., Oosterbaan, B., Erkens, S.M.J.G. ve Kooij, J.V.D.**, 2003. Semi-Circular Bending Test to Assess the Resistance Against Crack Growth, *Performance Testing and Evaluation of Bituminous Materials, Proceedings of the 6. International RILEM Symposium*, Zurich, April 13-16, 257-263.
- [125] **Bakker, M.**, 2001. SCB Test Results, Statistical Analysis, *TNO (Dutch Organisation for Applied Scientific Reserch) Report*, **TNO-report FSP-RPT-010048**, Netherlands.

- [126] **TS EN 12697-44**, 2010. Bitümlü Karışımlar - Sıcak Asfalt Karışımları İçin Deney Yöntemleri - Bölüm 44: Yarım Daire Eğilme Deneyi ile Çatlak İlerlemesi, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [127] **Marasteanu, M., Falchetto, A.C., Moon, K.H.**, 2009. Investigation of Low Temperature Cracking in Asphalt Pavements, *National Pooled Fund Study – Phase II*.
- [128] **Kim, K.W., Hussein, M.E.**, 1997. Variation of Fracture Toughness of Asphalt Concrete Under Low Temperatures, *Construction and Building Materials*, **11 (8)**, 403-411.
- [129] **Karihaloo, B.L., Nallathambi, P.**, 1991. Notched Beam Test: Mode-I Fracture Toughness, *In Fracture Mechanics Test Methods for Concrete*, **Report of Technical Committee 89-FMT**, RILEM.

## ÖZGEÇMİŞ

Mesude YILMAZ, 1982 yılında Elazığ'da doğmuştur. İlk, orta ve lise eğitimini Elazığ'da tamamlamıştır.

1999 yılında girdiği Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nden 2003 yılında İnşaat Mühendisi olarak mezun olmuştur. 2003 yılında Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans eğitimine başlamış, 2006 yılında eğitimini tamamlayarak Yüksek Mühendis olarak mezun olmuştur. 2006 yılında aynı anabilim dalında doktora eğitimine başlamıştır. 2006 yılında Sivas Kültür Varlıklarını Koruma Bölge Kurulu Müdürlüğü'ne İnşaat Mühendisi olarak atanmıştır. 2008 yılında Karayolları 8. Bölge Müdürlüğü'ne tayin olmuştur.

Evli ve bir çocuk annesi olan YILMAZ, 2008 yılından beri KGM 8. Bölge Müdürlüğü Sanat Yapıları Başmühendisliği'nde İnşaat Mühendisi olarak görev yapmaktadır.