

**ILIK KARIŞIM KATKISININ BİTÜM VE TAŞ MASTİK  
ASFALT KAPLAMAYA ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**İnÇ. Müh. Mustafa AKPOLAT  
121115103**

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

**DanıŐman: DoÇ. Dr. Baha Vural KÖK**




**TEMMUZ-2014**

T.C.  
FIRAT ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ILIK KARIŞIM KATKISININ BİTÜM  
VE  
TAŞ MASTİK ASFALT KAPLAMAYA ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ  
Mustafa AKPOLAT

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 28.04.2014  
Tezin Savunulduğu Tarih : 29.05.2014

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Baha Vural KÖK   
Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Necati KULOĞLU   
: Yrd. Doç. Dr. Tacettin GEÇKİL 

ELAZIĞ, 2014

## ÖNSÖZ

Günümüzde sürdürülebilir, yüksek performanslı, uzun ömürlü ve güvenli yolların yapılması hedeflenmektedir. Dolayısıyla, daha düşük sıcaklıklarda üretilebilen, daha iyi performans sergileyen ve doğal kaynakların verimli ve tekrar kullanılabilirliğine olanak sağlayan ılık asfalt teknolojisi geliştirilmiştir. Bu çalışmada, son zamanlarda özellikle üzerinde durulan sürdürülebilirlik kavramı dikkate alınarak daha az enerji kullanımı ile bitüm ve kaplamanın performansının ve ömrünün artırılması amaçlanmıştır.

Tez çalışmamın her aşamasında bilgi ve tecrübesiyle desteğini esirgemeyen, öğrendiğim her şeyde borçlu olduğum ve insani değerleriyle yaşamım boyunca örnek alacağım saygıdeğer hocam Doç. Dr. Baha Vural KÖK'e gönülden teşekkür ederim.

Yüksek lisansım boyunca her türlü desteğini esirgemeyen ve fikirlerini önemseydiğim ve hep önemseyeceğim değerli hocam Doç. Dr. Mehmet YILMAZ'a şükranlarımı sunarım.

Ayrıca, her konuda yardımını esirgemeyen Arş. Gör. M. Ertuğrul ÇELOĞLU ve Arş. Gör. Erkut YALÇIN'a teşekkür ederim.

Bu dönemde maddi ve manevi olarak daima yanımda olan aileme teşekkür ederim.

**Mustafa AKPOLAT**

**ELAZIĞ - 2014**

## İÇİNDEKİLER

### Sayfa No

ÖNSÖZ .....	III
İÇİNDEKİLER.....	IV
ÖZET .....	VII
SUMMARY .....	VIII
TABLOLAR LİSTESİ .....	XIII
ŞEKİLLER LİSTESİ .....	IX
SEMBOLLER LİSTESİ .....	XIII
KISALTMALAR.....	XV
<b>1. GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
<b>2. KARAYOLU VE KARAYOLLARININ YAPISI.....</b>	<b>3</b>
2.1 Karayolu Alt Yapısı.....	3
2.2 Karayolu Üst Yapıları.....	3
2.2.1 Alttemel Tabakası.....	4
2.2.2 Temel Tabakası .....	4
2.2.3 Kaplama Tabakaları.....	5
2.3 Esnek Üst Yapılarda Meydana Gelen Gerilmeler .....	5
2.3.1 Trafik Yükünden Meydana Gelen Gerilmeler.....	6
2.3.2 Sıcaklık Değişiminden Meydana Gelen Gerilmeler.....	8
<b>3. ESNEK YOL KAPLAMALARI .....</b>	<b>10</b>
3.1 Yüzeysel Kaplamalar.....	10
3.1.1 Sathi Kaplamalar .....	10
3.1.2 Harç Tipi Örtü (Slurry Seal).....	11
3.1.3 Karartma Tabakası (Fog Seal).....	12
3.1.4 Örtme Tabakası ( Cape Seal).....	13
3.2 Karışım Kaplamaları .....	13
3.2.1 Soğuk Karışım Asfalt Kaplamaları .....	13
3.2.2 Ilık Karışım Asfalt Kaplamaları .....	14
3.2.2.1 Ilık Karışım Asfaltın Avantajları.....	15

3.2.2.2 Ilık Karışım Asfalt Katkıları.....	16
3.2.2.3 Ilık Karışım Dizaynı ve Yapımı .....	21
3.2.2.4 Geri Dönüşüm .....	22
3.2.3 Sıcak Karışımlar .....	23
3.2.3.1 Asfalt Betonu Kaplamalar .....	23
3.2.3.2 Taş Mastik Asfalt Kaplamalar .....	25
3.2.3.3 Poroz Asfalt .....	32
3.2.4 . Bitümlü Sıcak Karışımlarda Meydana Gelen Bozulmalar .....	32
3.2.4.1 Şekil Değişirme .....	33
3.2.4.2 Çatlaklar .....	36
3.2.4.3 Ayrışmalar .....	39
3.2.5 Bitüm ve Karışımın Modifikasyonu .....	42
<b>4. BİTÜMLÜ KARIŞIMLARIN FİZİKSEL VE MEKANİK ÖZELLİKLERİ .....</b>	<b>49</b>
4.1 Stabilite .....	49
4.2 Yorulma Mukavemeti .....	49
4.3 Rijitlik .....	50
4.4 İşlenebilirlik .....	51
4.5 Nem Hassasiyeti .....	51
<b>5. ÇALIŞMADA UYGULANAN DENEY YÖNTEMLERİ.....</b>	<b>52</b>
5.1 Bitümlü Bağlayıcılar Üzerine Uygulanan Deney Yöntemleri.....	52
5.1.1 Penetrasyon Deneyi (TS 118 EN 1426) .....	52
5.1.2 Yumuşama Noktası Deneyi (TS 118 EN 1427) .....	52
5.1.3 Dinamik Kayma Reometresi Deneyi .....	53
5.1.4 Kiriş Eğme Reometresi (BBR) Deneyi .....	56
5.1.5 Dönel Viskozimetre (RV) Deneyi .....	58
5.2 Bitümlü Karışımlar Üzerine Uygulanan Deneyler .....	59
5.2.1 Marshall Stabilitesi ve Akma Deneyi .....	59
5.2.2 İndirek Çekme Rijitlik Modülü Deneyi.....	60
5.2.3 İndirek Çekme Yorulma Deneyi .....	61
5.2.4 Dinamik Sünme Deneyi .....	63
<b>6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR .....</b>	<b>66</b>
6.1. Malzeme Karakteristiklerinin Belirlenmesi.....	66

6.2. Modifiye Bağlayıcıların Hazırlanması .....	68
6.3. Bağlayıcılar Üzerinde Uygulanan Deney Sonuçları.....	70
6.3.1. Yumuşama Noktası Deney Sonuçları.....	70
6.3.2 Penetrasyon Deney Sonuçları.....	73
6.3.3 Dinamik Kesme Reometresi (DSR) Deney Sonuçları.....	74
6.3.4 Dönel Viskozimetre Deney Sonuçları .....	87
6.3.5 BBR Deney Sonuçları .....	90
6.4. Bitümlü Sıcak Karışım Numuneleri Üzerinde Uygulanan Deney Sonuçları .....	92
6.4.1 Optimum Bitüm Oranının Belirlenmesi .....	92
6.4.2 Marshall Stabilite ve Akma Deney Sonuçları .....	95
6.4.3 İndirek Çekme Rijitlik Modülü Deney Sonuçları .....	96
6.4.4 İndirek Çekme Yorulma Deney Sonuçları .....	97
6.4.5 Dinamik Sünme Deney Sonuçları .....	98
<b>7. SONUÇLAR.....</b>	<b>101</b>
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>103</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>109</b>

## ÖZET

Günümüzde daha yüksek standartlı ve sağlam yollar inşa etme çabası çeşitli katkı maddelerinin bitümlü kaplamalarda kullanımının yaygın şekilde araştırılmasını gerektirmiştir. Artık polimer modifikasyonu etkin bir şekilde uygulanırken, işlenebilirlik özelliklerini iyileştirerek daha iyi sıkışma ve ekonomi sağlayacak katkılar da gündeme gelmektedir. Bu tür katkılar işlenebilirlik özelliğinin yanı sıra performansa da katkı sağlayabilmektedir. Bu çalışmada değişik oranlarda stiren-butadien-stiren (SBS) ve bir ılık karışım katkısı olan Sasobit içeren bağlayıcıların geleneksel ve reolojik özellikleri ve bu bağlayıcılarla hazırlanan taş mastik asfalt kaplamaların mekanik özellikleri incelenmiştir. Katkılarının bağlayıcı ve karışım içerisinde hem ayrı olarak hem de birlikte kullanılmalarının etkileri değerlendirilmiştir. Sonuçta SBS modifikasyonunun tekerlek izi parametresi üzerinde Sasobit modifikasyonundan özellikle yüksek katkı oranlarında daha fazla etkili olduğu, Sasobitin viskoziteyi önemli derecede azalttığı ve yumuşama noktasını artırdığı, katkıların birlikte kullanımları durumunda Sasobit SBS modifikasyonunun esnekliğini artırma yönünde bir katkı sunduğu, %3 SBS ile beraber %3 Sasobit kullanımının mekanik özellikler açısından üstün performans sergilediği tespit edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Stiren-butadien-stiren, Sasobit, Taş mastik asfalt, Mekanik özellikler.

## **SUMMARY**

### **Investigation the effects of warm mix additive on the bitumen and stone mastic asphalt pavement**

The effort of constructing durable roads with higher standards has required to research the usage of various additives in bituminous coating so far. Nowadays polymer modification is effectively applied, and additives, which can provide better compaction and less expense by improving workability features are considered. . These additives contribute to performance as well as workability. In this study conventional and rheological properties of binders including stiren-butadien-stiren (SBS) and an organic warm mixture additive (Sasobit®) in various rates and also the mechanical properties of Stone mastic asphalt prepared by these binders are investigated. The effects of additives, which are used separately and together in the binder are examined. In conclusion it was determined that SBS modification has better than Sasobit modification in terms of rutting parameter especially in high temperatures. Sasobit® modification significantly decreased the viscosity and increased the softening point compared to SBS modification. It was also determined that Sasobit contribute to increase the flexibility of SBS modified bitumen in case the additives are used in the same binder together. The usage of 3% SBS with 3% Sasobit provide better performance with respect to mechanical properties.

**Key Words:** Styrene-butadiene-styrene, Sasobit, Stone mastic asphalt, Mechanical properties.



## ŞEKİLLER LİSTESİ

### Sayfa No

Şekil 2.1. Tipik Karayolu En Kesiti .....	4
Şekil 2.2. Üç tabakalı bir esnek üstyapıda yük eksenine etrafında oluşan düşey ve yatay gerilmeler.....	7
Şekil 2.3. Kaplama tabakasının aşırı çekme gerilmeleri altındaki bozuluşu.....	7
Şekil 2.4. Üstyapıdaki Gerilme Dağılışı.....	8
Şekil 2.5. Don Kabarması .....	9
Şekil 3.1. Sathi kaplama serimi .....	10
Şekil 3.2. Harç tipi örtü .....	12
Şekil 3.3. Karartma tabakası.....	12
Şekil 3.4. Örtme tabakası .....	13
Şekil 3.5. Üretim sıcaklıklarına göre karışımın sınıflandırılması ve yakıt tüketimi. ....	15
Şekil 3.6. Advera.....	17
Şekil 3.7. Aspha-Min.....	18
Şekil 3.8. Wam-Foam üretim tekniği .....	18
Şekil 3.9. Toz ve Granüler haldeki Sasobit katkısı .....	20
Şekil 3.10. Rediset WMX .....	21
Şekil 3.11. Agreganın granülometreleri .....	25
Şekil 3.12. Çeşitli sıcak karışımların gradasyon eğrisi .....	28
Şekil 3.13. Bitüm-emdirilmiş pelet-elyaf ile TMA karışım süreleri .....	31
Şekil 3.14. Poroz asfalt.....	32
Şekil 3.15. Oturma .....	33
Şekil 3.16. Yerel çökme .....	34
Şekil 3.17. Tekerlek izi oluşumu.....	34
Şekil 3.18. Ondülasyon .....	35
Şekil 3.19. Kabarma .....	35
Şekil 3.20. Tipik bir esnek üstyapısı (a) ve oluşan bozulmalar (b).....	36
Şekil 3.21. Yüksek ve orta şiddetli yorulma çatlakları.....	37
Şekil 3.22. Kenar çatlağı oluşumu .....	38
Şekil 3.23. Enine çatlaklar.....	38

Şekil 3.24. Yansıma çatlağı .....	39
Şekil 3.25. Oyuk .....	40
Şekil 3.26. Sökülme .....	41
Şekil 3.27. Soyulma .....	42
Şekil 3.28. Kusma .....	42
Şekil 3.29. Bitümün statik yükler karşısındaki davranışı.....	43
Şekil 3.30. Bitümün dinamik yükler karşısındaki davranışı. ....	44
Şekil 4.1. Sıcaklık veya Yükleme Süresinin bir Fonksiyonu Olarak Karışım Rijitliği.....	50
Şekil 5.1. Penetrasyon deney aleti.....	52
Şekil 5.2. Yumuşama noktası deney aleti .....	53
Şekil 5.3. Dinamik Kayma reometresi (DSR).....	54
Şekil 5.4. DSR deneyinde deformasyon yönleri .....	54
Şekil 5.5. Sabit kesme viskozitesi yönteminde kesme gerilme aralığı.....	55
Şekil 5.6. Sabit kesme viskozitesi yönteminde viskozite –sıcaklık ilişkisi.....	55
Şekil 5.7. Faz açısı yönteminde frekans- gerilme, faz açısı ilişkisi.....	56
Şekil 5.8. Kiriş Eğme Reometresi deney aleti (BBR).....	57
Şekil 5.9. Sünme oranının belirlenmesi.....	58
Şekil 5.10. Brookfield Dönel Viskozimetresi .....	58
Şekil 5.11. Marshall stabilite ve akma aleti .....	59
Şekil 5.12. İndirek çekme rijitlik modülü deney düzeneği .....	61
Şekil 5.13. İndirek çekme tekrarlı yorulma deney düzeneği.....	63
Şekil 5.14. Yük tekrar sayısı-Şekil değiştirme ilişkisi .....	64
Şekil 5.15. Yük-zaman ve deformasyon-zaman ilişkisi .....	64
Şekil 5.16. Dinamik sünme deney düzeneği .....	65
Şekil 6.1. Karıştırma milleri ve etkileri.....	69
Şekil 6.2. Çalışmada kullanılan karıştırma mili .....	69
Şekil 6.3. Modifiye bitüm karıştırma cihazı.....	70
Şekil 6.4. Katkı oranı yumuşama noktası ilişkisi .....	71
Şekil 6.5. SBS modifikasyonu içinde FT-parafin etkisi.....	71
Şekil 6.6. Sasobit modifikasyonu içinde SBS etkisi .....	72
Şekil 6.7. Bağlayıcı tiplerinin yumuşama noktalarındaki değişim.....	72
Şekil 6.8. Katkı oranı PI ilişkisi .....	74
Şekil 6.9. Bağlayıcıların PI değerlerindeki değişim.....	74

Şekil 6.10. Sasobit modifiyeli bağlayıcıların $G^*/\sin\delta$ değerlerinin sıcaklıkla değişimi .....	75
Şekil 6.11. SBS modifiyeli bağlayıcıların $G^*/\sin\delta$ değerlerinin sıcaklıkla değişimi .....	75
Şekil 6.12. 76 °C' de katkı içeriğinin $G^*/\sin\delta$ üzerindeki etkisi .....	75
Şekil 6.13. SBS modifikasyonu içinde Sasobitin etkisi .....	76
Şekil 6.14. Sasobit modifikasyonu içinde SBS etkisi .....	77
Şekil 6.15. 76 °C' de bağlayıcı tipine göre $G^*/\sin\delta$ ' da meydana gelen değişim .....	77
Şekil 6.16. 76 °C' de $G^*/\sin\delta$ değerine karşılık faz açısı değişimi .....	78
Şekil 6.17. Katkı içeriği ile faz açısı değişimi .....	78
Şekil 6.18. 76 °C' de bağlayıcı tipine göre faz açılarında meydana gelen değişim .....	79
Şekil 6.19. 0.1 Hz 50 °C' de katkı oranı- $G^*$ ilişkisi .....	80
Şekil 6.20. 0.1 Hz 80 °C katkı oranı- $G^*$ ilişkisi .....	80
Şekil 6.21. 1 Hz 50 °C katkı oranı- $G^*$ ilişkisi .....	80
Şekil 6.22. 1 Hz 80 °C katkı oranı- $G^*$ ilişkisi .....	81
Şekil 6.23. 0,1 Hz' de modifikasyon indisinin sıcaklıkla değişimi .....	81
Şekil 6.24. 50 °C bağlayıcı tipleri- $G^*$ ilişkisi .....	82
Şekil 6.25. 80 °C bağlayıcı tipleri- $G^*$ ilişkisi .....	82
Şekil 6.26. Katkı oranı-viskozite ilişkisi .....	84
Şekil 6.27. 82 °C' de katkıların birlikte kullanımının viskoziteye etkisi .....	85
Şekil 6.28. Bağlayıcı tiplerine göre karıştırma-sıkıştırma sıcaklıklarındaki değişim .....	85
Şekil 6.29. Bağlayıcıların faz açısı- frekans ilişkisi .....	86
Şekil 6.30. Bağlayıcıların kompleks modülü- frekans ilişkisi .....	86
Şekil 6.31. 135 °C deki dönel viskozite değerleri .....	88
Şekil 6.32. 165 °C deki dönel viskozite değerleri .....	89
Şekil 6.33. SBS modifikasyonunda Sasobitin etkisi .....	89
Şekil 6.34. Dönel viskozite yönteminde bağlayıcıların karıştırma-sıkıştırma sıcaklıkları ..	90
Şekil 6.35. Katkı oranı- sünme rijitliği ilişkisi .....	90
Şekil.6.36. Katkı oranı- m-value ilişkisi .....	91
Şekil.6.37. Katkı oranı- S/m ilişkisi .....	91
Şekil 6.38. Bütün bağlayıcıların S/m-value değerlerindeki değişim .....	92
Şekil 6.39. Yoğunluk – bağlayıcı oranı ilişkisi .....	93
Şekil 6.40. Stabilitate – bağlayıcı oranı ilişkisi .....	93
Şekil 6.41. Boşluk yüzdesi - bağlayıcı oranı ilişkisi .....	94

<b>Şekil 6.42.</b> Agregalar arası boşluk yüzdesi – bağlayıcı oranı ilişkisi.....	94
<b>Şekil 6.43.</b> Asfaltla dolu boşluk yüzdesi – bağlayıcı oranı ilişkisi .....	94
<b>Şekil 6.44.</b> Akma – bağlayıcı oranı ilişkisi .....	95
<b>Şekil 6.45.</b> Karışım tipleri-ITSM ilişkisi.....	97
<b>Şekil 6.46.</b> Yorulma deneyinde yük tekrarı-deformasyon ilişkisi.....	98
<b>Şekil 6.47.</b> Dinamik sünme deneyinde yük tekrarı-deformasyon ilişkisi.....	99
<b>Şekil 6.48.</b> Karışım tiplerinin akma sayıları.....	100

## TABLolar LİSTESİ

### Sayfa No

<b>Tablo 2.1.</b> Dingil yükleri ve uzaklıkları.....	6
<b>Tablo 3.1.</b> Tipik bir BSK üretimine göre WMA teknolojisinde emisyon azalması .....	16
<b>Tablo 3.2.</b> TMA’da kullanılacak kaba agrega özellikleri .....	27
<b>Tablo 3.3.</b> İnce agrega özellikleri .....	27
<b>Tablo 3.4.</b> TMA aşınma ve binder için gradasyonu ve tolerans sınırları.....	28
<b>Tablo 3.5.</b> TMA tasarım kriterleri .....	29
<b>Tablo 3.6.</b> Modifiye bitümün fiziksel özellikleri.....	45
<b>Tablo 3.7.</b> BSK katkı maddelerinin genel sınıflandırılması. ....	47
<b>Tablo 3.8.</b> Farklı tipteki katkı maddelerinin sağladıkları faydalar. ....	48
<b>Tablo 6.1.</b> Bağlayıcının Özellikleri.....	67
<b>Tablo 6.2.</b> Bağlayıcı kombinasyonları .....	67
<b>Tablo 6.3.</b> Agreganın Fiziksel Özellikleri .....	68
<b>Tablo 6.4.</b> Agrega Gradasyonu .....	68
<b>Tablo 6.5.</b> Penetrasyon deney sonuçları .....	73
<b>Tablo 6.6.</b> Bağlayıcıları 1,0 kPa değerini sağladığı sıcaklıklar .....	78
<b>Tablo 6.7.</b> Sabit kesme viskozitesi deney sonuçları .....	84
<b>Tablo 6.8.</b> Faz açısı yöntemine göre karıştırma sıkıştırma sıcaklıkları .....	87
<b>Tablo 6.9.</b> Dönel viskozimetre deney sonuçları.....	87
<b>Tablo 6.10.</b> KatkıSIZ TMA karışımlarının farklı bitüm içeriklerindeki özellikleri.....	93
<b>Tablo 6.11.</b> %6.5 bitüm içeriğindeki özellikler .....	95
<b>Tablo 6.12.</b> Marshall stabilite ve akma değerleri.....	96

## SEMBOLLER LİSTESİ

<b>G*</b>	: Kompleks kayma modülü
<b><math>\Delta</math></b>	: Faz açısı
<b>V<sub>a</sub></b>	: Hava boşluğu hacmi
<b>G<sub>mb</sub></b>	: Sıkıştırılmış karışımın hacim özgül ağırlığı
<b>VMA</b>	: Agregalar arası boşluk yüzdesi
<b>VFA</b>	: Asfaltla dolu mineral agregadaki boşluk yüzdesi
<b>H</b>	: Numune yüksekliği
<b>H</b>	: 5 yük tekrarı sonucunda oluşan ortalama yatay deformasyon
<b>F</b>	: İndirekt çekme rijitlik modülü deneyinde maksimum dikey yük
<b>R</b>	: Poisson oranı
<b>L</b>	: Ortalama numune yüksekliği
<b>E</b>	: Şekil değiştirme
<b>w</b>	: Frekans
<b>S<sub>(t)</sub></b>	: Sünme rijitliği
<b>m-değeri</b>	: Sünme oranı
<b>c</b>	: Düzeltme katsayısı
<b>S<sub>m</sub></b>	: Rijitlik modülü
<b><math>\Sigma</math></b>	: Gerilme

## KISALTMALAR

<b>AASHTO</b>	: American Association of State Highway and Transportation Officials (Amerikan Devlet Karayolu ve Ulaştırma Birliği)
<b>BBR</b>	: Bending Beam Rheometer (Kiriş Eğme Reometresi)
<b>BSK</b>	: Bitümlü Sıcak Karışım
<b>DSR</b>	: Dynamic Shear Rheometer (Dinamik Kayma Reometresi)
<b>İÇYD</b>	: İndirekt Çekme Yorulma Dayanımı
<b>ITSM</b>	: Indirect Tensile Stiffness Modulus (İndirek Çekme Rijitlik Modülü)
<b>KGM</b>	: Karayolları Genel Müdürlüğü
<b>LVDT</b>	: Linear Variable Differential Transformer (Doğrusal Değişken Türevsel Dönüştürücü)
<b>MQ</b>	: Marshall Quotient (Marshall Oranı)
<b>PG</b>	: Performance Grade (Performans Sınıfı)
<b>RMS</b>	: Retained Marshall Stability (Kalıcı Marshall Stabilitesi)
<b>RV</b>	: Rotational Viscometer (Dönel Vizkozimetre)
<b>TMA</b>	: Taş Mastik Asfalt
<b>TÜPRAŞ</b>	: Türkiye Petrol Rafinerileri Anonim Şirketi
<b>UMATTA</b>	: Universal Material Testing Apparatus(Üniversal Malzeme Deney Aleti)
<b>WMA</b>	: Warm Mix Asphalt(İlık Karışım Asfalt)

## 1. GİRİŞ

Ulaştırma sistemleri başta ekonomik olmak üzere sosyal siyasal ve kültürel gelişmeyi sağlaması yönünden en önemli altyapı yatırımı olarak görülmektedir. Ülkemizde son yıllarda yapılan ulaştırma yatırımları sayesinde hem toplam yol ağı uzunluğumuz hem de beton asfalt kaplamalı yol uzunluğumuz hızla artmaktadır. Son 10 yılda devlet yolları bakımından beton asfalt kaplamalı yol uzunluğu oranı %19,4'ten %35,8'e ulaşırken bu yatırımlar sayesinde sathi kaplama uzunluğu oranı %78,8'den %62,5'e düşmüştür [1]. Ancak her gün daha da artan ağır taşıt trafiği yollarımızı erken ve yapısal olarak tahrip edip bu yöndeki çabaların beton asfalt kaplamalı yol uzunluğunu artırmaktan çok, bakım onarımına harcanmasına neden olmakta bu sebeple yol mühendisleri daha sağlam, uzun süre bakım onarımına ihtiyaç göstermeyecek karışım tasarımları yapmak için çaba sarf etmektedirler. Kaplama tabakasında kullanılan bitümlü sıcak karışımların mühendislik özelliklerini iyileştirmek için iki temel yoldan birisi gradasyonu ve dolayısıyla asfalt çimentosu oranlarını değiştirmektir. Taş mastik asfalt bu kategoride karışım performansının iyileştirilmesi bakımından tipik bir örnektir. Diğer bir yol ise ya bitüme yada doğrudan karışıma ilave edilen katkı maddeleriyle bitümlü sıcak karışım özelliklerini iyileştirmektir. Yol üstyapısının özelliklerini iyileştirmek amacıyla bu yapı içerisindeki her bir bileşenin ya ayrı ayrı yada tamamının özellikleri iyileştirilmeye çalışılmaktadır. Bitümün ve bitümlü sıcak karışımların ısıya ve trafik yüklerine karşı dayanımını arttırmak amacıyla genellikle bitüme polimer kökenli katkı maddeleri ilave edilmektedir. Bu katkı maddeleri içerisinde en çok stiren-butadien-stiren (SBS) blok kopolimerleri kullanılmaktadır. Polimer türü malzemelerin elastomer grubuna giren SBS blok kopolimerleri, bitümlü bağlayıcıların elastikiyetini arttırmaktadır. SBS modifiyeli bitümlerde modifikasyonun etkin oluşabilmesi; SBS konsantrasyonuna, bitümün yapısına, karıştırma sıcaklığı ve süresi gibi birçok faktöre bağlıdır. Yapılan birçok çalışma sonucunda SBS'nin yüksek sıcaklıklarda karışımların tekerlek izi oluşumu ve yorulmaya karşı dayanımlarını arttırdığı belirlenmiştir. Bitümü ve dolayısıyla bitümlü karışımın modifiyesinde kullanılan diğer bir katkı da organik ılık karışım katkılarıdır.



Bu katkılar içinde yaygın olarak kullanılmaya başlayan FT-parafin (Sasobit®) üzerine yapılan çalışmalarda en çok vurgulanan sonuç, bu ılık karışım katkısının çok önemli ölçüde viskoziteyi düşürmesidir.

Bu çalışmada SBS ve Sasobit katkı maddelerinin bitüm ve bitümlü sıcak karışımlarda kullanımı geniş ölçekli olarak değerlendirilmiştir. Çalışmada katkıların hem ayrı olarak hem de aynı karışım içinde birlikte kullanılmalarının etkileri incelenmiştir.

## **2. KARAYOLU VE KARAYOLLARININ YAPISI**

İnsanların veya eşyaların bir yerden başka bir yere hızlı, ekonomik, güvenli ve konforlu bir şekilde yer değiştirmesine ulaşım denir [2]. Ülkelerin kalkınması ve refah seviyesinin artmasında önemli bir yere sahip olan ulaştırma sistemleri: karayolu, deniz yolu, hava yolu, demir yolu ve boru hatları olarak sınıflandırılmaktadır. Yük ve yolcu taşımacılığının %95'inin karayolu ile yapıldığı ülkemizde, 2012 Aralık ayı verilerine göre 65.382 km karayolu ağı bulunmaktadır [1]. Günümüzde hızlı nüfus artışı ve ekonomik kalkınmayla birlikte insanların ulaşım ile olan bağlantısı günden güne artmaktadır ve bu da beraberinde ulaşım sistemlerinin güncellenmesini gerektirmektedir. Bu güncelleme var olan ulaşım ağlarının rehabilitasyonu ve yeni ve en ekonomik ulaştırma sistemlerinin inşası ile mümkündür.

### **2.1 Karayolu Alt Yapısı**

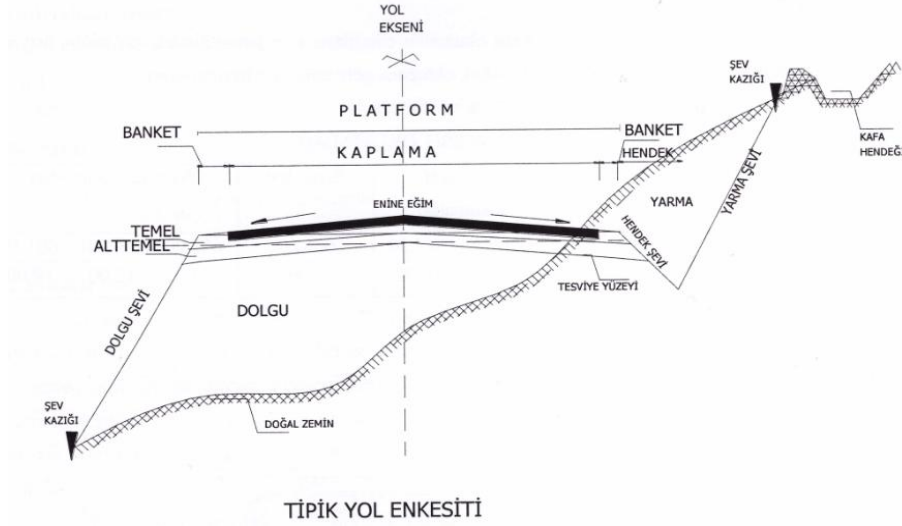
Karayolu alt yapısı toprak işleri sonunda, projede belirlenen enkesit ve kot haline getirilmiş kısımdır. Üst yapının oturduğu, yarma kesimlerinde, alttemel tabakasının altındaki doğal zemin dolgularda ise, yarma kesimlerinden veya ödünç yerlerinden taşınan toprak ile doğal zemin üzerine inşa edilir. Menfez, drenaj tesisleri ve istinat duvarı gibi sanat yapıları da alt yapı içerisinde [3,4].

Yol alt yapısı, trafikten oluşacak yükleri daha geniş bir alana yaymayı ve istenilen kotta düzgün bir yüzey elde etmeyi sağlar. Bu yüzden alt yapıda kullanılacak zeminin, trafik yüklerine, don ve su etkilerine karşı dayanıklı olması gerekmektedir [5].

### **2.2 Karayolu Üst Yapıları**

Üst yapılar rijit, esnek ve kompozit olmak üzere üç şekilde yapılabilmektedir. Rijit kaplamalar alt temel tabakası üzerine inşa edilmiş beton plaklardan oluşmaktadır. Esnek kaplamalar çok tabakalı yapılardır. Alt tabakaları granüler malzemedan oluşan ve dren kabiliyeti yüksek, üst tabakaları ise bitümlü karışımlarla yapılan stabilitesi yüksek ve konforlu bir sürüş olanağı tanıyan kaplamalardır. Kompozit kaplamalar ise bozulmuş beton

kaplamalar üzerine bitümlü sıcak karışım takviyesiyle veya zamanla bozulmuş esnek kaplamalar üzerine beton kaplama inşa edilerek elde edilir. Esnek kaplamalar alttemel, temel ve kaplama tabakalarından oluşmaktadır [6]. Karayolu yapısına ait tipik bir enkesit Şekil 2.1’ de verilmiştir.



Şekil 2.1. Tipik Karayolu En Kesiti

### 2.2.1 Alttemel Tabakası

Alttemel tabakası esnek kaplamaların en alt tabakası olup düşük taşıma gücüne sahip ancak iyi dren olabilen, don kabarması, şişme ve büzülme gibi hacim değişikliklerine karşı koyabilen ve kaplamanın taşıma gücünü arttıran granüler malzemelerden yapılmaktadır [6]. Mümkün mertebe yerel malzemeler ve yol inşaatında kullanılmaya elverişli malzemeler (molozlar, cürufklar, inşaat atıkları gibi) kullanılmaya çalışılır [7].

### 2.2.2 Temel Tabakası

Bir esnek üstyapının temel tabakası, kaplama tabakasının hemen altına yerleştirilen, daneli veya uygun bir bağlayıcı ile işlem görmüş tabakadır. Temel olarak birden fazla tabaka yapılabilir. Temel tabakasının başlıca görevi kaplama tabakasına dayanak sağlayarak üstyapının yük taşıma kabiliyetini artırmaktır. Trafik yüklerinden doğan yüksek kayma gerilmelerine karşı koyabilmeli ve yüksek nem oranında dengede kalabilmelidir. Temel tabakası ayrıca, drenaja yardımcı olabildiği gibi, don etkisine karşı da ek bir

korunma sağlayabilir [8]. Temel tabakaları trafik hacmine göre granüler temel (GT), plent-miks temel (PMT) ve çimento bağlayıcılı granüler temel (ÇBGT) olmak üzere üç farklı şekilde yapılabilir.

**Granüler Temel:** Çakıl, kırılmış çakıl, kırılmış cüruf, veya kırmataş ile ince malzemenin verilen gradasyon limitleri içerisinde sürekli bir gradasyon verecek şekilde su ile karıştırılması ile elde edilen ve yeterli taşıma gücüne sahip taban veya alttemel üzerine bir veya birkaç tabaka halinde serilip sıkıştırılmasıyla oluşturulan tabakadır [8].

**Plent-Miks Temel:** Belirli fiziksel şartları sağlayan ve iyi derecelendirilmiş bir gradasyona sahip agreganın plentte optimum su içeriğinde karıştırılıp yola serilmesi ile oluşturulan tabakadır [6].

**Çimento Bağlayıcılı Granüler temel:** Çakıl, kırılmış çakıl, kırılmış cüruf, kırmataş ve ince malzeme kullanılarak belirli gradasyon limitleri içerisinde uygun oranlarda çimento ve su ile plentte karıştırılıp, yeterli bir alttemel üzerine bir veya birkaç tabaka halinde serilip sıkıştırılması ile oluşan tabakadır [8]. Özellikle otoyol gibi yüksek standartlı yollarda yüksek stabiliteli bir temel olarak kullanılmaktadır [6].

### 2.2.3 Kaplama Tabakaları

Üstyapının trafik yüklerine doğrudan maruz kalan en üst tabakası kaplama tabakasıdır. Trafik yükleri nedeniyle oluşan basınç ve çekme gerilmelerinin en yüksek seviyede olması nedeniyle kaplama tabakası, üstyapının diğer tabakalarına göre daha yüksek bir elastisite modülüne sahip olmalıdır. Bu tabaka, gerekirse aşınma ve binder olarak iki kısımdan oluşur. Aşınma tabakası çok kaliteli inşa edilmesi gereken, trafiğe dayanım yanında su geçirimsizliğini sağlamak ve sürtünme oluşturmakla görevlidir. Kaplama tabakasının trafiği emniyetli ve konforlu bir şekilde geçirebilmesi için yeterli pürüzlülükte üniform bir yuvarlanma yüzeyine sahip olması gerekir. Ayrıca, taşıtlardan su sıçramasını önleyecek özellikte olması gereklidir [9].

### 2.3 Esnek Üst Yapılarda Meydana Gelen Gerilmeler

- Trafik yükünden meydana gelen gerilmeler
- Sıcaklık değişiminden meydana gelen gerilmeler olmak üzere 2 başlık altında inceleyebiliriz.

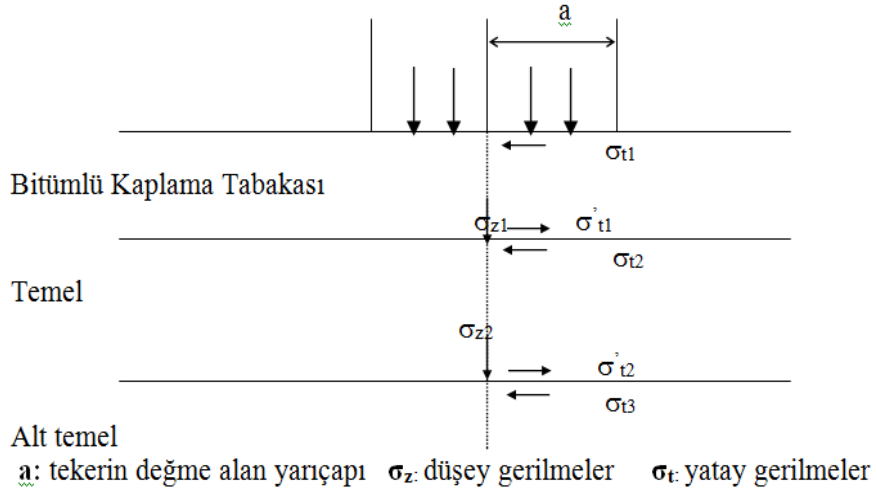
### 2.3.1 Trafik Yükünden Meydana Gelen Gerilmeler

Yol üzerinde seyreden taşıtların ağırlıkları dingil sayısı kadar kısımlara ayrılır ve tekerlek bandajları ile kaplamaya iletilir. Yola gelen yüklerin üstyapı hesaplarında tam olarak analiz edilmesi ve ekonomik olmayan kalınlıkların çıkmaması için ve ayrıca yüklerin bozucu etkisini önlemek için dingil yükleri ve dingiller arası uzaklıklar sınırlandırılmıştır. 2012 yılı araçların imal, tadil ve montajı hakkındaki yönetmeliğe göre dingil mesafeleri ve yükleri Tablo 2.1’ de verilmiştir.

**Tablo 2.1.** Dingil yükleri ve uzaklıkları

Dingil Sayısı		Dingiller Arası Mesafe (m)	Azami Dingil Yüğü (ton)
Tek Dingiller	Tahriksiz	-	10
	Tahrikli	-	11,5
İki Dingilli Aks Grupları		$d < 1,0$	11
		$1,0 \leq d < 1,3$	16
		$1,3 \leq d < 1,8$	18
		$1,8 \leq d$	20
Üçlü Dingiller		$d \leq 1,3$	21
		$1,3 < d \leq 1,4$	24

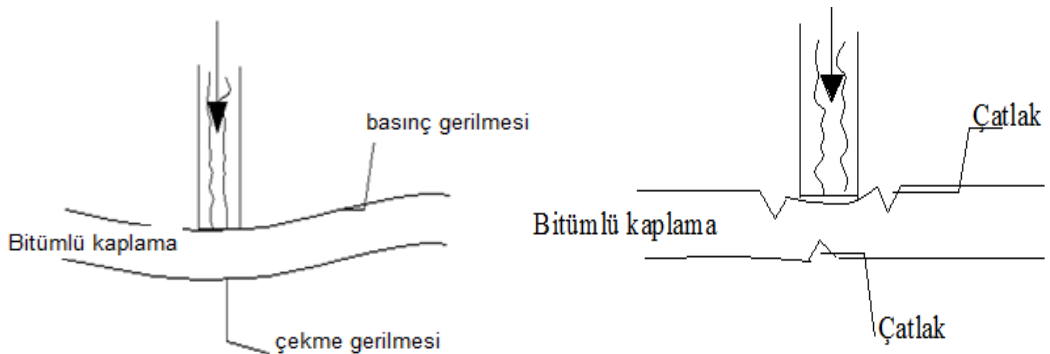
Trafik yüklerinden doğan gerilmeler hareket halinde olan veya duran taşıtların yola uyguladıkları gerilmelerdir. Yol yüzeyi ile tekerlek bandajı arasında etkiyen düşey yükler ve yatay kayma kuvvetleri yol tabakalarında basınç, çekme ve kayma gerilmeleri doğurur. Bu gerilmelerin şiddeti dingil yüküne, bandajın şişirme basıncına, taşıtın hızına bağlıdır. Hareketli teker yüklerinin etki süresi 0.1–0.01 sn arasında değişir. Yapılan gözlemler sonucunda hızlı giden taşıtların yavaş giden taşıtlara göre daha düşük gerilmeler uyguladığı görülmüştür. Üç tabakalı bir üstyapıda yük eksenini etrafında oluşan düşey ve yatay gerilmeler Şekil 2.2’ de verilmiştir.



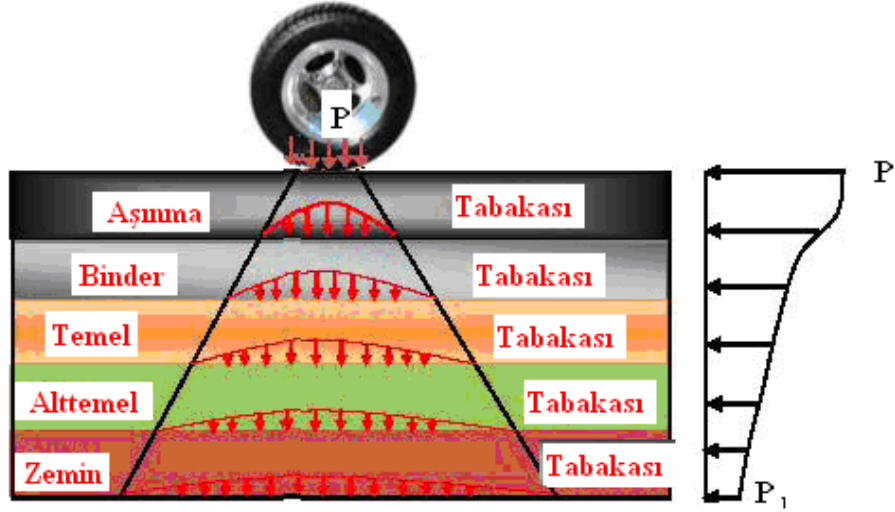
Şekil 2.2. Üç tabakalı bir esnek üstyapıda yük ekseninde oluşan düşey ve yatay gerilmeler [10].

Bir üstyapının bozulması ya yüzeydeki kaplama tabakası ile temel tabakasının arakesitindeki aşırı çekme ( $\sigma'_{t1}$ ) veya temeldeki aşırı basınç ( $\sigma_{z2}$ ) nedeni ile olur. Üstyapı tabakalarının boyutlandırılmasında ( $\sigma_z$ ) ve ( $\sigma_t$ ) gerilme değerlerinin her tabaka için kritik gerilme değerlerinin altında olmasına dikkat edilmelidir. Eğer ( $\sigma'_{t1}$ ) çekme gerilmeleri aşırı ise yüzeydeki kaplama tabakasının temel tabakası ile ara kesitinde çatlaklar oluşur ve bu çatlaklar yukarı doğru yayılır. Eğer ( $\sigma_{z2}$ ) gerilmesi aşırı ise temel tabakasında üniform olmayan önemli oturmalar olur, bunun sonucunda da büyük çekme gerilmeleri doğar [10].

Şekil 2.3' de kaplama tabakasının aşırı çekme gerilmeleri altında bozulması, Şekil 2.4' de yollardaki düşey gerilme dağılımları görülmektedir.



Şekil 2.3. Kaplama tabakasının aşırı çekme gerilmeleri altındaki bozulması [10].

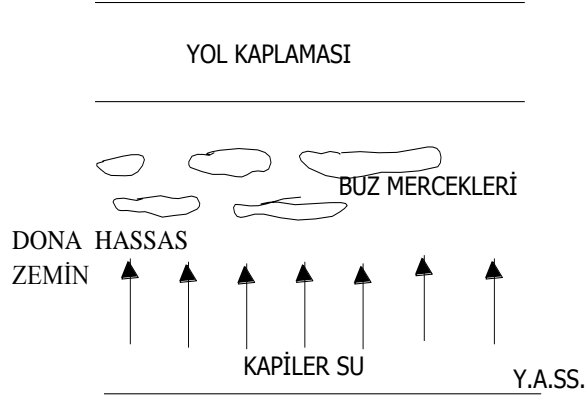


Şekil 2.4. Üstyapıdaki Gerilme Dağılışı [11].

### 2.3.2 Sıcaklık Değişiminden Meydana Gelen Gerilmeler

Sıcaklığın düşmesiyle beraber bitümlü kaplama tabakası büzölmeye çalışır. Temel tabakası ise kaplama tabakası ile arasındaki sürtünmeye karşı koyar. Buna bağlı olarak çekme gerilmeleri meydana gelir. Ayrıca mineral agreganın hacimsel genişleme katsayısı asfaltın genişleme katsayısından düşüktür. Bu nedenle sıcaklık düştüğünde farklı genişlemelerden dolayı daneler arasındaki asfalt filminde gerilmeler oluşur. Bu gerilmelerin artması asfalt filminin kopmasına veya oyukların oluşmasına neden olur.

Kışın don olayı da bitümlü kaplama tabakasında çekme gerilmelerinin oluşmasına neden olur. Don kabarması, kaplamanın dona hassas olan taban zemini ve temel tabakasında oluşan buz mercikleri ile yukarı doğru yükselmesine denir. Havanın ısısı düştükçe su, önce buz kristallerine dönüşür (Şekil 2.5). Sonra bu buz kristalleri buz mercikleri oluşuncaya kadar büyür ve sonuçta don kabarması oluşur. Bu kabarma sonucunda kaplamada çekme gerilmeleri olur. Bu gerilmeler kaplamada enine ve boyuna çatlaklar oluşturabilir [10].



Şekil 2.5. Don Kabarması



### 3. ESNEK YOL KAPLAMALARI

#### 3.1 Yüzeysel Kaplamalar

##### 3.1.1 Sathi Kaplamalar

Sathi kaplamalar, granüler malzemeden oluşturulmuş temel ve alttemel tabakası üzerine inşa edilen, düzgün yuvarlanma yüzeyi sağlayan, yeterli kayma sürtünme katsayısı sağlayan, trafik yükü taşıma kapasitesi olmayan ve yüzey sularının alt tabakalara geçmesini engelleyen bir kaplama türüdür [12]. 2012 KGM yol ağının satıl cinsinin dağılımına göre 63.255 km yol ağının 46.462 km' si sathi kaplamadır. Bu da yaklaşık % 73' e tekabül etmektedir [1]. Son zamanlarda bitümlü sıcak karışım (BSK) kaplama yapımı artsa da geriye kalan oran azımsanmayacak kadar büyüktür. Buda sathi kaplamanın önemini ortaya koymaktadır. Şekil 3.1' de sathi kaplama serimi görülmektedir.



Şekil 3.1. Sathi kaplama serimi

Sathi kaplama, yol sathına ince bir film halinde bitüm püskürtme ve üzerini agregayla örtme işlemdir [13]. Sathi kaplamaları 4 başlık altında inceleyebiliriz.

**Tek katlı sathi kaplama:** Granüler, plent-miks ve çimento bağlayıcılı granüler temeller ile asfalt veya beton kaplamalar üzerine, ince bir tabaka halinde bitümlü bağlayıcının uygulanmasının ardından bağlayıcın üzerine gradasyon limitlerine uygun agreganın serilip silindirilmesi ile yapılan kaplama tipidir [13].

**Çift katlı sathi kaplama:** Tek katlı sathi kaplamada olduğu gibi serim ve sıkıştırma işlemleri yapılmaktadır. Ancak ikinci tabakada kullanılacak nominal agrega boyutu birinci tabakada kullanılan agrega boyutunun yarısından daha büyük olmamalıdır.

**Bitümlü Koruyucu Sathi Kaplama:** Mevcut kaplamanın ömrünü uzatmak, sürtünme direncini arttırmak, eski ve soyulmuş yüzeyleri yenilemek ve yüzey rengi değişikliği ile daha iyi bir görüş sağlamak amacıyla, asfalt betonu üzerine ince bir bitümlü bağlayıcı tabakası ve ardından agrega tabakasının serilip sıkıştırılmasıyla yapılan kaplama türüdür. Koruyucu sathi kaplama tabakası 12,5 mm' den daha az kalınlıkta olmalıdır.

**Makadam Sathi Kaplama:** Yeterli taşıma gücüne sahip astarlanmış temel tabakası üzerine sırayla kaba agrega, 1. bitüm tabakası, orta agrega, 2. bitüm tabakası ve ince agreganın sırayla serilmesi ve silindirilmesi ile yapılan kaplamadır [8].

### 3.1.2 Harç Tipi Örtü (Slurry Seal)

Harç tipi örtü (Şekil 3.2); agrega, mineral filler(gerekliyse), asfalt emülsiyonu ve sudan oluşan bir karışımdır. Aşınma tabakasında oluşan çatlakların kapanması, soyulmuş ve soyulmaya başlamış yüzeylerin onarımı ve ayrıca cilalanmış üstyapıların sürüş emniyetini arttırmak için kullanılır [14].

Harç tipi örtünün, zamanında uygulanması; asfalt oksidasyonu ve kaplamanın soyulması nedeniyle oluşabilecek yüzey hatalarını azaltacaktır. Satih çatlaklarını kapatacak, sökülmeyle durduracak, açık satırları hava ve su geçirmez bir hale getirecek, kayganlığa karşı direnci ve üstyapı görünümünü geliştirecektir. Harç tipi örtünün faydaları: Hızlı uygulanabilme özelliğine sahip olması, boya şeritleri için mükemmel bir yüzey dokusu sağlar, küçük yüzey hatalarını düzeltebilme özelliğine sahiptir, sürtünme katsayısının artması ile birlikte sürüş güvenliğinin artmasını sağlar [15].

Harç tipi örtü tabakasında agrega; sert, pürüzlü, temiz ve sağlam danelerden oluşmalı ve kırma taşı veya kırma çakıldan hazırlanmalıdır. Kum eşdeğerliliği ASTM D 2419'a göre minimum 45 olmalıdır.



Şekil 3.2. Harç tipi örtü

### 3.1.3 Karartma Tabakası (Fog Seal)

Bu tip tabakada, sıvı asfalt kaplama yüzeyine çok ince bir tabaka halinde püskürtülmektedir. Bu uygulamanın amacı; kaplamaya su ve havanın girmesini önlemek, kaplamadan agreganın kopmasını önlemek ve kaplama yüzeyinin yenilenmesi olarak sayılabilir. Kullanılacak bağlayıcı SS-1, SS-1h, CCS-1 veya CSS-1h tipi yavaş kesilen asfalt emülsiyonlarıdır. Şekil 3.3’ de örnek bir karartma tabakası gösterilmiştir [6].



Şekil 3.3. Karartma tabakası

### 3.1.4 Örtme Tabakası ( Cape Seal)

Örtme tabakasının amacı bozulmuş asfalt kaplamalar üzerine uygun boyuttaki agrega ile tek kat sathi kaplama yapıldıktan sonra üzerine emülsiyon asfaltlı harç tipi tabaka yapılarak kaplamanın bir süre daha kullanılmasını sağlamaktır (Şekil 3.4). Bu tabaka ile kaplamanın kayma direnci artırıldığı gibi geçirimsiz bir yüzeyde oluşturulmaktadır. Bu tip kaplama özellikle esnek kaplamalı havaalanı pistlerinde yabancı madde hasarını azaltmak amacıyla, küçük yarıçaplı yonca kavşaklarda ve çok dik eğimli yollarda kayma direncini arttırmak amacıyla yapılmaktadır [6].



Şekil 3.4. Örtme tabakası

## 3.2 Karışım Kaplamaları

### 3.2.1 Soğuk Karışım Asfalt Kaplamaları

Soğuk karışım asfalt kaplamaları, genellikle asfalt emülsiyonları veya katbek asfalt ile agreganın soğuk halde yada agrega yüzeyindeki nemin kurumasına yetecek kadar sıcaklıkta karıştırılması ile elde edilen karışım tipidir. Karıştırma yol üzerinde, yol kenarı boyunca veya sabit bir karıştırma tesisinde yapılabilir. Soğuk karışımlar aşınma, temel veya alttemel tabakalarında kullanılabilir. Hafif ve orta dereceli trafik

yoğunluğunda aşınma tabakası olarak kullanılması uygundur. Temel ve alttemel için her türlü trafikte uygulanabilir.

Soğuk karışımlarda kullanılacak asfalt agregaya karıştırma yöntemine ve iklim koşullarına bağlıdır [16].

Soğuk karışımlar kendi içinde ikiye ayrılırlar:

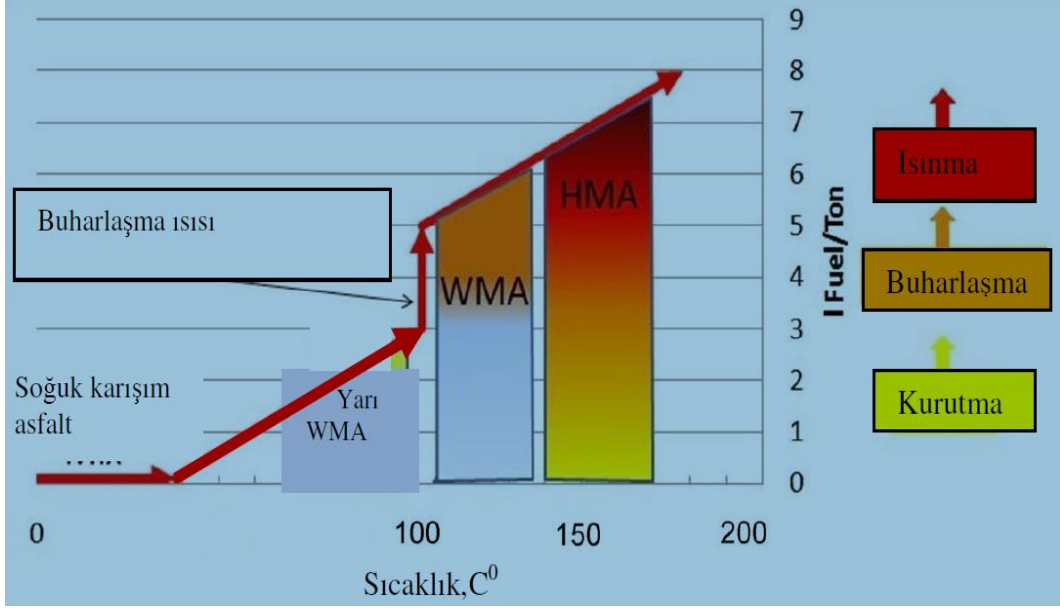
***Yuğun gradasyonlu soğuk karışımlar:*** Esası asfalt çimentosu olan asfalt emülsiyonlu yarı yoğun soğuk karışımlarda boşluk oranı %12'den azdır. İlk dayanımları az olup zamanla dayanımları artmaktadır. Bu süre zarfında yolda oluşan tekerlek izleri eğer oluklaşmamışsa kaybolurlar.

***Açık gradasyonlu soğuk karışımlar:*** Boşluk oranı %12'den fazla olan bitümlü karışımlardır. Mukavemetleri çok yüksektir. Ekonomik açıdan uygundur ve tekerlek yükleri altında deforme olmazlar [16-19].

### **3.2.2 Ilık Karışım Asfalt Kaplamaları**

Son yıllarda artan çevre ve sürdürülebilirlik kavramı bilinciyle, çevresel etkileri en az olan üretim ve uygulama tekniklerinde önemli gelişmeler kaydedilmiştir. Bu çerçevede, sıcak karışım asfaltın üretimi ve uygulamasında enerji tasarrufu sağlanması ve çevreye yayılan emisyonların azalması amacıyla üretimin daha düşük sıcaklıklarda yapılabilmesi için yeni teknolojiler geliştirilmiştir. “Ilık Karışım Asfalt” - WMA (Warm-Mix.Asphalt) olarak bilinen bu teknoloji, yoğun gradasyonlu asfalt, taş mastik asfalt, poroz asfalt ve mastik asfalt karışımları dahil tüm bitümlü karışımların hazırlanmasında kullanılmaktadır [20]. Ayrıca ılık karışım asfalt daha yüksek oranlarda geri kazanılmış asfalt kullanımına da olanak sağlamaktadır.

Bitümlü sıcak karışımlara göre 20-50 °C daha düşük sıcaklıklarda yaklaşık 100-140 °C arasında üretilen ve sıkıştırılan karışımlar, ılık karışım asfalt olarak tanımlanır. Son zamanlarda geri dönüşümün artması ile birlikte ılık karışım asfaltının da kullanımı artmıştır. Asfalt karışımları Şekil 3.5’de görüldüğü gibi üretim sıcaklıklarına bağlı olarak; soğuk, yarı ılık, ılık ve sıcak asfalt olarak sınıflandırılır. Aynı şekilde üretim sırasında kullanılan yakıt miktarı da görülmektedir.



Şekil 3.5. Üretim sıcaklıklarına göre karışımın sınıflandırılması ve yakıt tüketimi [20].

### 3.2.2.1 Ilık Karışım Asfaltın Avantajları

- Düşük sıcaklıklarda üretim ve serim
- Daha az enerji ve yakıt tüketimi dolayısıyla düşük maliyet
- Karıştırma ve taşıma sırasında daha az yaşlanma ve böylece daha uzun servis ömrü
- Emisyonların azalması (Tablo 3.1)
- Kısa zamanda ve düşük sıcaklıkta ısıtmaya bağlı olarak duman miktarında azalma
- İnşaat süresinin uzaması (Düşük sıcaklıklarda çalışmaya olanak sağlar)
- Taşıma mesafesinde artış sağlar
- Plentte çalışan işçilerin çalışma şartlarında iyileştirme sağlar [21].

**Tablo 3.1.** Tipik bir BSK üretimine göre WMA teknolojisinde emisyon azalması [20].

<b>Emisyonlar</b>	<b>Tipik Bir BSK Üretimine Göre Emisyonlardaki Azalma (%)</b>
CO <sub>2</sub> ve SO <sub>2</sub>	30-40
Uçucu organik bileşikler	50
CO	10-30
Azot oksitler (NO <sub>x</sub> )	60-70
Toz	20-25

Düşük sıcaklıktaki asfalt karışımlarının kullanımı yeni bir teknoloji değildir. 1956' da, Prof. Ladis Csanyi, bağlayıcının köpüklendirilerek kullanılabileceğini belirtmiştir. Günümüze kadar köpüklendirme yöntemi ile karışım sıcaklığı düşürülmüş ve birçok ülkede başarılı bir şekilde uygulanmıştır. 1994'de, Maccarone ve ekibi soğuk asfalt çalışmasında köpük bağlayıcı ve çok yüksek bağlayıcı içerikli emülsiyonların kullanılabilirliği araştırmış ve dünya çapında düşük emisyonlu ve düşük enerjiyle üretilen karışım olarak kabul görmüştür [22].

1997' de Sasol Wax firması tarafından geliştirilen Sasobit® Avrupada sıkışmaya yardımcı ürün olarak pazarlanmaya başlanmıştır [24]. Şimdi ise bu ürün ılık karışım asfalt katkısı olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

Ilık karışım asfaltlarda yoğun gradasyon kullanılarak birçok çalışma yapılmıştır. Ancak, Koenders ve diğ. (2000), ılık karışım asfaltlarının diğer asfalt karışım tipleri için de ( açık-gardasyon, kesikli gradasyon) uygulanabileceğini ve geleneksel asfalt karışım plantlerinin ve kaplama ekipmanları ve teknolojilerinin kullanılabilceğini belirtmişlerdir [23].

### 3.2.2.2 Ilık Karışım Asfalt Katkıları

Ilık karışım asfaltlar, köpüklendirme yöntemi (Sentetik zeolitler, Wam-Foam® ve Low Energy Asphalt®), organik katkıları (Sasobit® ve Asphaltan B®) ve kimyasal katkıları (Evothem®, Rediset®WMX ve Revix®) gibi üç farklı yöntem kullanılarak üretilmektedir.

**Advera®** (Şekil 3.6): PQ şirketi tarafından ABD' de üretilmektedir. İçerisinde %20 oranında su içeren, kristalize yapıya sahip bir sentetik zeolittir. Yapısındaki suyun 98 °C ve



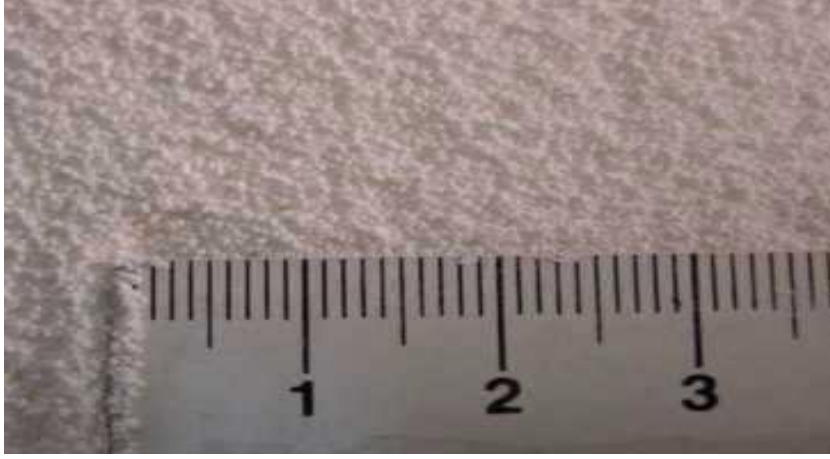
üzerindeki sıcaklıklarda dışarı çıkmasıyla bitümün viskozitesini düşürerek işlenebilirliği artırır [25]. Tavsiye edilen oran karışımın % 0,25'i kadar bitüme eklenmesidir. Polimer modifiyeli bitümlerde, açık, yoğun ve kesikli gradasyona sahip karışımlarda ve geri dönüştürülmüş asfalt kaplamalarda kullanılmaktadır. Karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarında önemli derecede düşüş sağlamasıyla emisyonlarda % 60' a kadar azalma ve % 30 oranında enerji tasarrufu sağlamaktadır [26].



Şekil 3.6. Advera

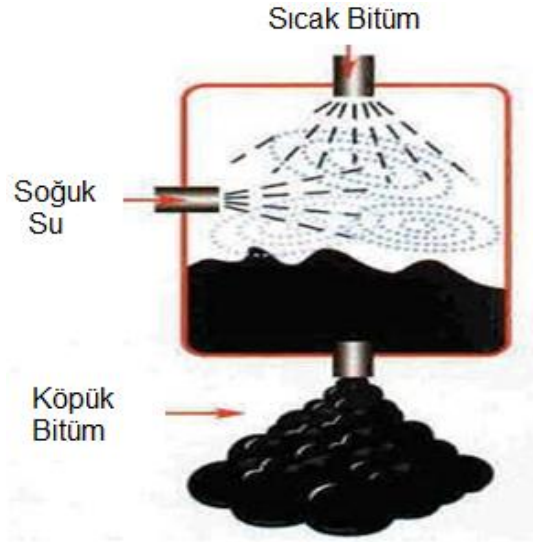
**Aspha-Min<sup>®</sup>** (Şekil 3.7): Eurovia Services GmbH tarafından Almanya'da üretilmektedir. İçerisinde %20-21 oranında kristalize su bulunduran sentetik zeolit katkısıdır [27]. Karışımın %0,3'ü oranında bitüme ilave edilir ve içerisinde bulunan kristalize suyun 85-180 °C' de açığa çıkmasıyla köpüklenmeye neden olur. Köpüklenen bitümün hacmi genişleyerek düşük sıcaklıklarda agreganın bitümle kaplanmasını sağlar ve işlenebilirliği artırır. Karıştırma sıcaklığında bitümlü sıcak karışımlara oranla 15 °C' lik bir azalma sağlar. Böylece %30 oranında yakıt tasarrufu sağlanmış olur. Her türlü bitüm, modifiye bitüm ve geri dönüştürülmüş asfalt kaplamalarda kullanılabilir [26,27].





Şelil 3.7. Aspha-Min

**Wam-Foam<sup>®</sup>** (Şekil 3.8): Londra, İngiltere merkezli Shell International Petroleum Company Ltd. ile Oslo, Norveç merkezli Kolo–Veidekke firmalarının ortak girişiminin ürettiği bir katkıdır. Karışım iki aşamada yapılmaktadır ve her bir aşama için farklı bitümler kullanılmaktadır. Öncelikle, yumuşak bitüm 110 C' de agrega ile karıştırılarak agrega yüzeyi bitümle kaplanır. Bitüm ile kaplanan agregalara, su enjeksiyonu ile köpükendirilmiş sert bitüm ilave edilir ve yeniden karıştırılır. Üretici firmanın verilerine göre, Wam-Foam<sup>®</sup> katkısının kullanımıyla yakıttan ve zararlı emisyon salınımından %30 oranında azalma sağlanmaktadır [28].



Şekil 3.8. Wam-Foam üretim tekniği

**Low-Energy Asphalt®** : Low-Energy Asphalt® (LEA) Suit-Kote Company, McConaughay Technologies firmaları tarafından Fransa'da üretilmiştir. LEA katkısı kimyasal bir katkıdır ve direkt olarak bitüme ilave edilir. Yaklaşık 140 °C' deki kaba agrega ile 140-180 °C deki LEA katkılı bitüm karıştırılır ve daha sonra ıslak ince agrega karışıma katılır. İnce agreganın ıslak olmasından dolayı bitümde köpüklenmeyle birlikte hacminde artış olur ve bitüm agregayı çok hızlı bir şekilde sarar. Karışımın son sıcaklığı 100 °C' nin altında olmalıdır. Bu sıcaklık enerji tasarrufu için kritik sıcaklıktır [29].

LEA ılık karışım asfaltlar için karıştırma sıcaklığı 98°C, sıkıştırma sıcaklığı ise 76°C olarak belirlenmiştir. Karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarının düşük olması üretim sırasında harcanan enerjiyi % 40–55 oranında azaltmaktadır. Ürünün geri dönüştürülmüş asfalt kaplamalarda kullanılması, asfalt plentlerinde düzenleme ve bir eklenti yapılmasını gerektirmektedir [26].

**FT-Parafin (Sasobit®)**: Sasobit® Güney Afrika firması olan Sasol Wax firması tarafından üretilmiştir. Sasobit®, Fischer-Tropsch sentezi kullanılarak kömürün gazlaştırılmasından üretilen ince kristalli, uzun zincirli alifatik polietilen hidrokarbondur. Toz ve granüler halde bulunan Sasobit® Şekil 3.9' da görülmektedir. Sasobit® üreticileri, FT parafin mumu ile doğal olarak oluşan bitüm esaslı mumların yapılarına bakıldığında, aralarında oluşan farklılıkların karbon zincir uzunluğu ile bağlantılı olduğunu belirtmişlerdir. FT parafin mumunun hidrokarbonlarının baskın zincir uzunlukları 40 ile 115 karbon atomu aralığında iken asfaltta doğal olarak bulunan bitümlü parafin mumlarının zincir uzunlukları ise 25 ile 50 karbon atomu arasındadır. Bu yapıdan dolayı Sasobitin yumuşama noktası bitümlü parafin mumundan daha yüksektir [30].

Sasobit, SBS modifiyesi ile özel bir çapraz bağlantı kurmaktadır ve bu Sasoflex olarak adlandırılmaktadır. Sasobit veya Sasoflex yüksek kesmeli karıştırıcı olmadan bağlayıcı içersinde karıştırılabilir. Sasobit, düşük sıcaklıktaki karışım özelliklerini negatif yönde etkilemektedir [31].

Sasobitin polimerlerle birleşmesi plastomer ve elastomer bileşenlerinden oluşan Sasoflex'in oluşmasını sağlayarak özel bir çapraz bağ teşkilini mümkün kılmaktadır. Plastomer bileşeni karıştırma ve serme esnasında karışımın viskozitesini düşürmekte ve servis sıcaklıklarında bağlayıcıyı serleştirmektedir. Elastomer bileşeni ise düşük sıcaklıklarda esnek davranışın korunmasını sağlamaktadır [32].

1997' den beri 142 projede yaklaşık 2,271,059 m<sup>2</sup> kaplamada Sasobit katkısı kullanılmıştır. Bu projelerde çok sayıda agrega tipi ve karışım tipleri (yoğun gradasyonlu karışımlar, kesik gradasyonlu karışımlar, taş mastik asfalt ve mastik asfalt) uygulanmıştır. Sasobit oranları bitüm ağırlığına % 0,8-4 arasında değişmektedir [31].



Şekil 3.9. Toz ve Granüler haldeki Sasobit katkısı

**Asphaltan B<sup>®</sup>** : Almanya'da Romonta GmbH firması tarafından üretilmektedir. Montan mumu bileşenleri ile daha yüksek moleküler ağırlıklı hidrokarbon maddelerin bir karışımıdır. Ham Montan mumu Almanya, Doğu Avrupa ve Amerika Birleşik Devletleri'nin bazı linyit kömürü alanlarında bulunmaktadır. Montan mumu, tolüen çözücüsü ve yüksek sıcaklıktaki buhar ile kömürden ayrıştırılır. Yüksek stabilitesi ve suda çözünmeme özelliği sayesinde mum uzun süre bozulmadan kalabilir. Üretici firmaya göre Asphaltan B<sup>®</sup>, karışımın ağırlığına %2 – 4 arası eklenmelidir. Asphaltan B<sup>®</sup>, doğrudan bitümlü bağlayıcıya eklenebileceği gibi, karışıma veya polimer modifiye bitüme de eklenebilmektedir. 98°C'de eriyen Asphaltan B<sup>®</sup>, daha rahat bir sıkıştırma sağlarken tekerlek izi oluşumuna karşı direnci de arttırır [26].

**Evotherm<sup>®</sup>** : Evotherm<sup>®</sup> Amerikalı MeadWestvaco Asphalt Innovations firması tarafından üretilmektedir. Evotherm üretimi, katyonik emülsifikasyonlu maddeler içeren kimyasal bir teknolojiyi kullanır. Agregaların yüzey kaplamasını yani adezyonu artırır. Karışımın işlenebilirliğini ve sıkışabilirliğini geliştirir [21].

**Rediset® WMX:** Rediset® WMX Akzo Nobel tarafından üretilmiş kimyasal bir ılık karışım katkısıdır. Katyonik yüzey aktif maddeler ve organik katkı kombinasyonu ile reolojik düzenleyici olarak kullanılmaktadır. Rediset WMX su içermez, yüzey aktif maddeler ıslak agrega yüzeylerinin bağlayıcı ile adezyonunu artırır [33]. Önerilen kullanılma oranı bağlayıcı ağırlığının %1,5-2'si kadardır.

Rediset® WMX (Şekil 3.10), bitümün kohezyonunu artırır, tekerlek izi oluşumunu azaltır. Ayrıca, Rediset® WMX soyulma önleyici bir katkı olduğundan, neme karşı hassasiyeti azaltarak kaplamanın servis ömrünün uzamasına da yardımcı olur [34].



Şekil 3.10. Rediset WMX

**Revix®:** Revix® kimyasal bir ılık asfalt katkısıdır. Mathy Techonology and Engineering Services ve Paragon Technical Services tarafından geliştirilmiştir. Revix® köpüklendirme ve viskozite düşürmeye dayalı olmaktan çok, yapım ve üretim aşamasında asfalt bağlayıcı ile agregalar arasındaki içsel sürtünmeyi azaltır [35].

### 3.2.2.3 Ilık Karışım Dizaynı ve Yapımı

Ilık karışım asfalt dizaynı önemli bir konudur. Çünkü dünyada henüz şartnamelere girmiş bir ılık karışım dizaynı bulunmamaktadır. Şu anda bitüm sınıfı ve gradasyon seçimi sıcak asfalt karışım standartlarına göre yapılmaktadır. Ilık karışım asfalt araştırmacılarına ve güncel bulgulara göre standart karışım dizaynı ılık karışım asfaltları için modifiye edilmelidir.

**Bağlayıcı Seçimi:** Romier ve ekibi LEA katkılı ılık asfalt karışımlarında sıcak karışım asfalt için kullandıkları bağlayıcı sınıfını kullanmışlardır ve diğer ılık asfalt katkıları için de kullanılabilir olduğunu söylemişlerdir [29]. Hurley ve Prowell, Sasobit ve Aspha-min katkılı çalışmalarında, ılık asfalt karışımlarda PG 64-22 bağlayıcı sınıfı kullanılmış ve karıştırma ve sıkıştırma sıcaklığı bakımından PG 58-28 bağlayıcı sıcak karışım asfalt ile karşılaştırılmıştır. Yaklaşık olarak aynı hava boşluğu yüzdesine, daha düşük karıştırma ve sıkıştırma sıcaklığında ulaşılmıştır [27,31].

**Gradasyon:** Dünyadaki ılık asfalt katkıları üreticileri ve yol otoriteleri, laboratuvar ve yollarda tipik sıcak karışım asfalttaki yoğun gradasyonu kullanmaktadırlar [27,29,31]. Koenders ve diğerleri ılık asfalt karışımlarının diğer gradasyonlarla kullanılabilmesine işaret etmişlerdir [23,29]. Kristjansdottir, raporunda Sasobit' in yalnızca yoğun gradasyonla değil TMA karışımlarında ve mastik asfaltta kullanılabilmesini belirtmiştir [36].

**Optimum Bitüm Yüzdesi Tespiti:** Birçok araştırmacı ılık asfaltta kullanılacak optimum bitüm yüzdesi hakkında daha fazla araştırma yapılana kadar standart sıcak karışım asfalt prosedürlerinin uygulanmasını önermektedirler. Bunun sebebinin WMA katkılarının sıkıştırmayı etkileyici bir şekilde iyileştirdiğinden sıcak karışıma göre optimum bitüm oranını %0.5 oranında azalttığı ancak bunun da durabilite, permabilite ve su hassasiyeti açısından bir sorun olabileceği olarak belirtilmiştir [21].

#### 3.2.2.4 Geri Dönüşüm

Bozulmuş eski asfalt kaplama malzemesinin yeni kaplama tabakalarının yapımında kullanılması asfaltta geri dönüşüm olarak adlandırılmaktadır. Enerjinin verimli şekilde kullanımı, asfaltın yeniden kullanımından kaynaklanan ekonomik avantaj, mevcut kullanılabilen agrega kaynaklarının azalması ve artan üretim maliyetlerinden dolayı geri kazanım işlemlerine gittikçe artan bir ilgi söz konusudur.

Bu yöntemde bozulmuş aşınma tabakası veya gerekli ise aşınma tabakasının altındaki tabakalar kazılıp elde edilen malzemeye belirlenen oranlarda yeni agrega, bitüm ve yaşlanmış bitümün viskozitesini arttırmak amacıyla katkı malzemeleri ilave edilerek yeni malzeme elde edilir.

Asfaltın geri dönüşümü ile birlikte, hizmet ömrünü tamamlamış tabakaların yeniden kullanımı, çevre korunması, enerji kaybının önlenmesi, ekonomik kazanım ve mevcut

kaplamanın üzerine yeni kaplama yapılması halinde yansıma çatlaklarının önlenememesi, kot yükselmesi vb. sorunların giderilmesi gibi kazançlar sağlanacaktır. Geri kazanım kaplamaları iki şekilde yapılabilmektedir.

**Yolda Karışım;** Mevcut bozulmuş kaplamanın 20 mm kazılması ve tekrar yolda sıcak karışım halinde serilip sıkıştırılması ile yapılmaktadır. Bu şekilde yapılan uygulamada yolda mobil karışım plenti kullanılmaktadır. Tekrar kaplama işlemi olarak da adlandırılmaktadır.

Yerinde soğuk geri dönüşüm yani tekrar uygulama işlemi, 75 mm kalınlığa kadar kazılan kaplama malzemesi 1 veya 2 tabaka halinde asfalt emülsiyonu ile karıştırılarak serilip sıkıştırılır. Bu metot genellikle düşük standartlı karayollarında, kentiçi yollarda vb. yerlerde çok ekonomik olmakta ve oldukça iyi sonuçlar alınmaktadır.

**Plentte Karışım;** Plentte karışımında iki şekilde yapılabilmektedir. Bozunmuş asfalt tabakası kazınıp plente taşınır, homojen bir şekilde karıştırılır ve depolanır. Depolanan malzemeden temsili numune alınır ve karışım-tasarımı belirlenir. Bu tasarıma göre plentte bitümlü sıcak karışım olarak üretilir ve yola nakledilerek yeni aşınma tabakası inşa edilir. Ya da bozuk kaplamadan belirli aralıklarla karot numuneleri alınır ve bunlar üzerine yapılan test sonuçlarına göre karışım tasarımı belirlenir yol kazınıp plentte sıcak karışım olarak üretilir ve yeni aşınma tabakası inşa edilir [6].

### **3.2.3 Sıcak Karışımlar**

#### **3.2.3.1 Asfalt Betonu Kaplamalar**

Bitümlü sıcak karışımlar, agregası, bitüm ve hava olmak üzere üç fazlı bir sistemden oluşmaktadır. Agregası katı fazı, bitüm sıvı fazı ve boşluklar gaz fazını oluştururlar. Sıvı fazı oluşturan bitüm viskoelastik ve termoplastik bir malzemedir. Viskoelastik malzemelerde gerilme-şekil değiştirme ilişkisi yüklem zamanı ile değişmektedir. Viskoelastik malzemeler yüksek hızlı yüklemelerde elastik davranış ve yüksek mukavemet gösterirken, düşük hızlı yüklemelerde viskoz davranış ve düşük mukavemet gösterirler. Termoplastik malzemelerde ise gerilme-şekil değiştirme davranışı sıcaklıkla ilişkili olarak değişmektedir. Termoplastik malzemeler yüksek sıcaklıklarda düşük mukavemet, düşük sıcaklıklarda ise yüksek mukavemet gösterirler. Bitüm'ün bu özellikleri, bitümlü sıcak karışımlara yansiyarak karışımın mekanik özellikleri üzerinde önemli etki yapmaktadır.

BSK'ların en önemli mekanik özellikleri, rijitlik, çekme dayanımı, kalıcı deformasyonlar - tekerlek izi oluşumu ve yorulma davranışdır [37].

Bitümlü karışımlar, bir asfalt plentinde agregaya ile asfalt bağlayıcının sıcak olarak karıştırılıp yola nakledildikten sonra sıcak olarak sıkıştırılması şeklinde imal edilirler. Bitümlü sıcak karışımlar; aşınma, binder, bitümlü temel tabakalarında kullanılır. Sıcaklık artmasıyla birlikte bitüm agregaya püskürtülerek karıştırılır. Meydana gelen karışım soğuduğunda oldukça katı ve dayanıklıdır. Trafik yüklerinin yarattığı gerilmelere ve çevresel etkilere en fazla maruz olduklarından dolayı temel ve alttemel tabakalarına göre stabil ve durabil olmalıdırlar. Bu tabakalar ayrıca taşıtlar için düzgün pürüzsüz yüzeyleri ile sürüş konforunu ve sürtünme dirençleriyle sürüş emniyetini sağlamalı, trafiğin ve çevrenin aşındırma etkilerine, deformasyonlara karşı dirençli olmalıdır. Bu tip kaplamalar teker yükleri altında elastik olarak esneme kapasitesine sahip olmalıdır. Kalıcı deformasyon yapmadan yükleri, alt tabakalara ve zemine emniyetle intikal ettirebilmelidir. Bu nedenlerden dolayı bu tip kaplamalar “esnek kaplamalar” olarak da adlandırılmaktadır [38].

Yüksek standartlı karayolları, otoyollar ve havaalanlarında yapılacak esnek kaplamalar için bitümlü sıcak karışımlar (asfalt betonu) kullanılmaktadır. Bu karışımlar bütün dünyada yol üst yapısında geniş bir şekilde uygulanmaktadır.

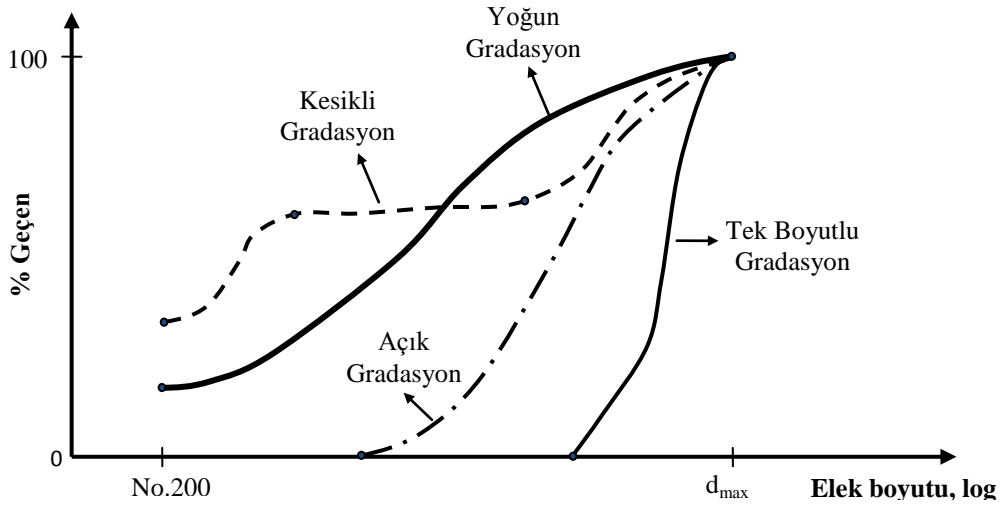
Sıcak karışım kaplamalar karışımdaki agregaya gradasyonu ve kullanım amacına bağlı olarak 4 farklı şekilde sınıflandırılmaktadır. Şekil 3.11’de agregaya granülometrileri verilmiştir.

***Açık Granülometrilik Sıcak Karışımlar:*** Bu karışımlarda ince agregaya oranı çok az, dolayısıyla boşluk oranı fazladır ( %5-15). Makadam tipi kaplamalar bu sınıfa girer.

***Kesikli Granülometrilik Sıcak Karışımlar:*** Agregaya oranı belli elek aralarında fazla belli elek aralığında çok az veya hiç yoktur. Boşluk oranı %8 ila %12 arasında olan bu tür karışımlar, pürüzlü bir yüzey verirler ve tekerlek izine karşı dirençleri yüksektir. Taş mastik asfalt bu karışımlara en iyi örnektir.

***Yoğun Granülometrilik Sıcak Karışımlar:*** Agregaya granülometrisi düşük boşluk verecek şekilde süreklilik gösterir. Bunlar boşluk oranı %2-5 arasında olan bitümlü karışımlardır. Bitümlü temel ve asfalt betonu bu sınıfa girer. Yüzey pürüzlülüğü azdır.

**Harç Tipi Karışımlar:** İnce malzeme miktarı fazladır ve kaba agrega, ince malzeme bitüm karışımı içinde dağılmış halde bulunmaktadır. Bu tür karışımlarda boşluk oranı az olup bitüm yüzdesi çok yüksek olduğundan penetrasyonu düşük (viskozitesi yüksek) asfalt yani sert bitüm kullanılır. Yüzey pürüzlülüğü azdır. Beton ve çelik köprüler üzerinde de kullanılan mastik asfalt bu tür kaplamalara örnek olarak verilebilir [39].



Şekil 3.11. Agrega granülometrileri

### 3.2.3.2 Taş Mastik Asfalt Kaplamalar

Almanya'da 1960'lı yılların sonunda çivili otomobil lastiklerinin geliştirilmesiyle asfalt aşınma tabakalarında meydana gelen büyük hasarlar yeni asfalt kaplama anlayışının geliştirilmesine neden olmuştur.

Yüksek tekerlek izini önlemek amacıyla ilk olarak asfalt betonundan oluşan iyileştirme tabakaları uygulanmıştır. Ancak bu yöntemle istenilen başarı elde edilememiş ve kum, filler ve yüksek bitüm oranıyla elde edilen mastik kaplama uygulamada yerini almıştır. Hasarlı kesimler üzerine dökülen sıvı karışım üzerine kaba agregalar serpilmiş ve sıcak mastiğin içine sıkıştırılmıştır. Kullanılan bitüm ve kaba agrega oranları bitümün agregadan süzülmesine neden olmuşsa da daha sonra kullanılan stabilize arttırıcı katkı malzemeleri(elyaf) ile bu sorun çözülmüştür [40].



1975 yılında çivili lastikli tekerlek kullanımı yasaklanmıştır. Sonraki yıllarda ağır trafik yükündeki karayolları aşınma tabakasında, asfalt beton ve taş mastik asfalt(TMA) karışımlarında farklı performanslar görülmüştür. Yüksek bitüm oranlı asfalt betonda kalıcı deformasyon ve düşük bitüm oranlı asfalt betonda ise yaşlanma ile çatlama gözlenmiştir. Buna karşı aynı koşullardaki TMA aşınma tabakasında söz konusu iki bozulma da gözlenmemiştir [41].

Almanya'da 1984 yılında ilk defa teknik şartnamelerde yerini alan TMA, bugüne kadar birçok değişikliğe maruz kalmıştır. Bugün Taş Mastik Asfaltlarından talep edilen nitelikler TL Asphalt-StB ve ZTV Asphalt-StB ve KGM teknik şartnameleriyle belirlenmektedir.

TMA üretimi, nakliyesi ve uygulaması asfalt betonu gibi gerçekleşmektedir. Ancak bu işlemlerde dikkat edilmesi gereken unsurlar TMA'nın kalitesini olağanüstü etkilemektedir. Kullanılan stabilize edici katkı malzemelerine, yüksek bitüm ve kaba agregaya oranlarına üretimde dikkat edilmesi gerekmektedir. Nakliye ve serimde asfalt betonları için de geçerli olan kalite standartlarının uygulanması büyük önem taşımaktadır.

TMA'larda ana eleman olan kırılmış agregaların mükemmel kenetlenmesi sonucu, kalıcı deformasyona karşı yüksek stabilite ve aşınmaya karşı direnç, taş iskelet yapısını saran yüksek bitüm oranı ile birlikte, boşluksuz mastik harcı elde edilmesi ile erken oluşan çatlaklara, çözülmeye karşı dayanıklılık ve daha uzun servis ömrü sunan bir karışım elde edilmektedir. Bitümün süzülmesini engelleyen ve stabiliteyi arttıran elyaf katkıları, asfalt karışımının üretimini, taşınması ve serilmesi sırasında homojenliği sağlamaktadır. TMA'nın, kalıcı deformasyona karşı yüksek stabilite, aşınmaya karşı direnç, yavaş yaşlanma ve prematüre çatlama karşı durabilite, yüksek bağlayıcı içeriği sayesinde düşük sıcaklık performansının iyi olması, servis ömrünün uzun olması ve bakım gereğinin daha az olması avantajları arasındadır.

***Taş mastik asfalt kaplamaların teknik özellikleri:*** Taş mastik asfalt karışımlarda agregalar arasında daha fazla temas olduğundan bu karışımda kullanılan agreganın, yoğun gradasyonlu geleneksel asfalt betonu kaplamada kullanılan agregadan daha üstün nitelikli olması gerekmektedir. TMA kaba agregası granit, bazalt veya diğer yüksek kaliteli magmatik kayaların kırılmasından elde edilen agregalardan oluşmaktadır. Kaba agregaya çakıldan üretildiğinde, agreganın tüm yüzleri kırılmış olmalıdır. Kaba ve ince agregaya Tablo 3.2 ve 3.3'de belirtilen özelliklere sahip olmalıdır.

**Tablo 3.2.** TMA’da kullanılacak kaba agrega özellikleri [8].

Deney	Şartname limitleri***	Deney standardı
Parçalanma Direnci Kaybı (Los Angeles), %	≤ 25	TS EN 1097-2* AASHTO T 96
Aşınma Direnci Kaybı (Micro-Deval)**, %	≤ 20	TS EN 1097-1
Hava Tesirlerine Karşı Dayanıklılık, (MgSO4 ile kayıp), %	≤ 14	TS EN 1367-2
Yassılık indeksi, %	≤ 25	BS-812
	≤ 20 (FI20)	TS EN 933-3*
Cıalanma Değeri, &	≥ 50 (PSV50) ≥ 40 (PSV40) binder için	TS EN 1097-8
Soyulma Mukavemeti, % (24 saat °60 suda bekletmeden sonra)	≥ 60	KTŞ Kısım 403 EK- A
Su Emme, %	≤ 2,0 (WA24 2)	TS EN 1097-6
Kil Topakları ve Ufalanabilir Daneler, maksimum %	bulunmayacak	TS-3526 (ASTM C-142)
* Referans metot. ** Gerek görüldüğünde yapılacaktır. *** Parantez içindeki ifade, şartname değerinin TS EN 13043’ deki sınıfını gösterir.		

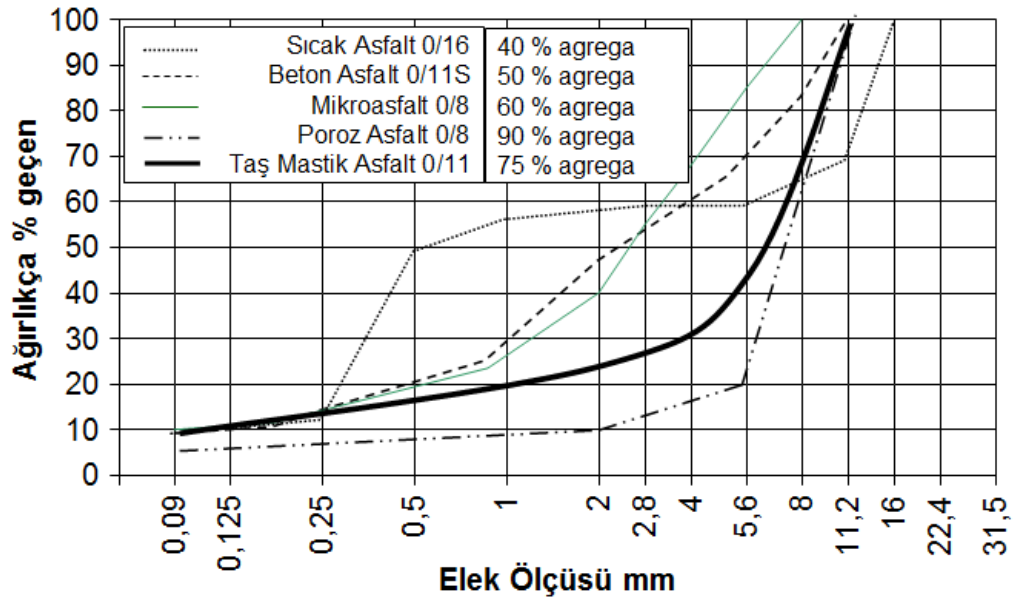
**Tablo 3.3.** İnce agrega özellikleri [8].

Deney	Şartname limitleri	Deney standardı
Plastisite İndeksi	N.P.	TS-1900-1
Organik Madde, %	Negatif	TS EN 1744-1 Madde 15.1
Su Emme, %	≤ 2,0 (WA24 2)	TS EN 1097-6
Metilen Mavisi, g/kg	İnce agreganın 0/2 mm kısmına ≤ 1,5 (MB1,5) ≤ 3,0 (MB3,0)*	TS EN 933-9
	Öğütülmüş magmatik agreganın 0/2 mm kısmına ≤ 3,0 (MB3,0)*	
* Magmatik kökenli kayalarda, şantiye konkasöründe üretilmiş ince agregada istenen şartname değerinin sağlanmaması durumunda bu şart aranacaktır.		

Taş mastik asfalt karışımlarda kullanılan agrega gradasyonu Tablo 3.4'te verilmiştir. Gradasyonun mineral agrega, filler dahil en az dört ayrı tane grubunun belli oranlarda karıştırılmasından oluşması gerekmektedir. Bitümlü malzemeler ile karıştırıldığı zaman agrega üniform olmalıdır. Karışım tasarım gradasyonundan sapmalar tolerans limitleri içinde kalmalıdır. Çeşitli sıcak karışım tiplerine ve TMA'ya ait gradasyon eğrileri Şekil 3.12'de verilmiştir. Taş mastik asfaltların tasarımı laboratuarda Marshall tasarım yöntemine göre yapılabilmektedir. Tablo 3.5'te TMA'nın tasarım kriterleri verilmiştir.

**Tablo 3.4.** TMA aşınma ve binder için gradasyonu ve tolerans sınırları [8].

Elek boyutu		TİP-1		TİP-2	TMA Binder	Tolerans limitleri
		A	B			
İnç-No	mm	Geçen %	Geçen %	Geçen %	Geçen %	%
3/4"	19	100	100	-	92-100	±4
1/2"	12.5	90-100	90-100	100	73-83	±4
3/8"	9.5	50-75	50-67	90-100	56-66	±4
No.4	4.45	25-40	25-35	25-45	32-42	±3
No.10	2.00	20-30	20-30	20-30	25-30	±3
No.40	0.42	12-22	12-22	12-22	14-20	±3
No.80	0.177	9-17	9-17	9-17	9-15	±3
No.200	0.075	8-14	8-12	8-14	7-11	±2



**Şekil 3.12.** Çeşitli sıcak karışımların gradasyon eğrisi

**Tablo 3.5.** TMA tasarım kriterleri [8].

Özellikler	Şartname limitleri		Deney Standartları
	Aşınma	Binder	
Briket Yapımında Uygulanacak Darbe Sayısı	50	50	TS EN 12697-30
Hava Boşlukları, (%)	2-4	3-4	TS EN 12697-8
Sıcak İklim bölgelerinde hava boşlukları, (%)	3-4		
Agregalar arası boşluk (VMA), (%), min.	TİP -1 16	13	TS EN 12697-8
	TİP -2 17		
Bitümlü Bağlayıcı, (%) min.	TİP -1 5,8	5,2	TS EN 12697-1
	TİP -2 6,5		
İndirekt çekme mukavemeti oranı, min. (%)	80	80	AASHTO T 283
Tekerlek izinde oturma * (30.000 devirde, 60°C' de), (%), maks.	6	6	TS EN 12697-22
Elyaf miktarı, %	0,3-1,0	0,2-0,8	
Schellenberger bitüm süzülme deneyi, (%), maks.	0.3	0,3	TS EN 12697-18
Not: Tabakalar arası yapışma dayanımı TS EN 12697-48' e göre yapılabilecektir.			

**Taş mastik asfaltların uygulama alanları:** TMA her tür yüzey tabakası için uygundur ve önerilir. Fakat, TMA genellikle anayol projelerinde uygulanır. TMA, asfalt betonuna göre biraz daha pahalı görünmesine karşın, ömür-maliyet yönünden daha ekonomiktir. Anayol projelerinde TMA en çok kabul gören ve uygulanan asfalt karışımıdır ve anayol üstyapılarında yoğun olarak kullanılır. TMA tipini seçerken, maksimum tane boyunu, küçük seçme eğilimi vardır. Maksimum tane boyutunu küçük seçme eğiliminin yüksek olması, aşağıda sıralanan nedenlerle açıklanır:

- Kalınlık az olduğu için, birim alan maliyeti azalır
- Trafik altında daha az ses olur
- Daha iyi kayma direnci vardır
- Büyük tane boyu, daha kalın yüzey tabakası gerektirir ve bu da daha fazla birim maliyet oluşturur,

TMA kaplamalarının gösterdiği yüksek performanstan dolayı havaalanlarında kullanılması giderek yaygınlaşmaktadır. Örneğin, Frankfurt' ta Fraport Havaalanına yılda 200.000' den fazla uçak kalkış-iniş yapmaktadır ve burada TMA kaplaması Sasobit ile

modifiye edilmiş ve başarıyla uygulanmıştır. Oslo' da Gardermon ve Güney Afrika' da Johannesburg havaalanlarında TMA kullanılmıştır [42].

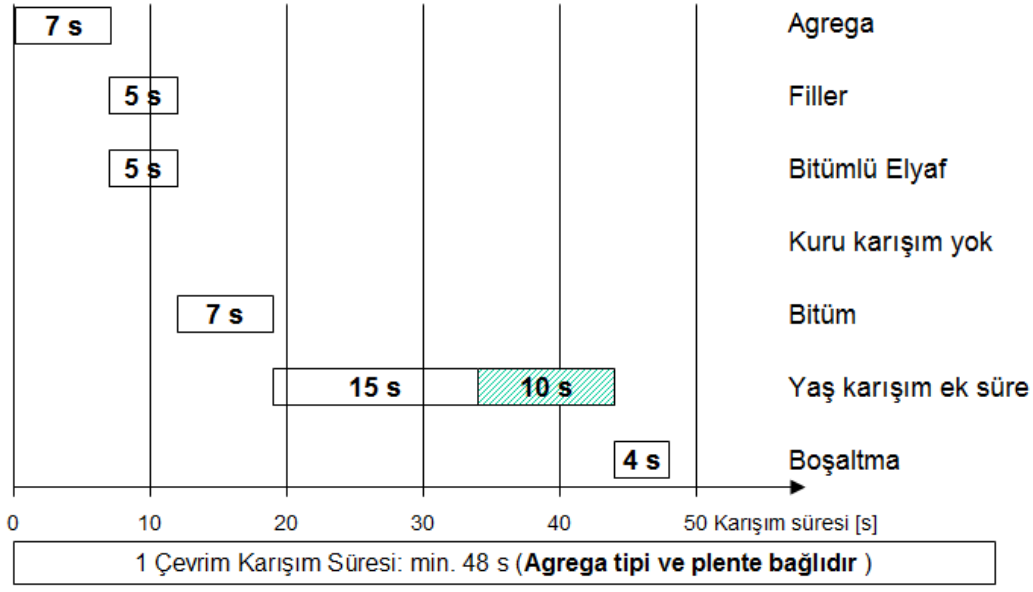
Köprülerde uygulanacak döşemeler, soğuma ve ısınma etkilerine karşı hassastır. Örneğin, kış aylarında kaynaklanan buzlanma, köprü kaplamasında, toprak zemin üzerine inşa edilen asfalt kaplamadan önce, hızlı ve yoğun bir şekilde kendini gösterir. Bundan dolayı köprü kaplamalarında yorulma direncine karşı yüksek dayanımlı, modifiyeli ve yüksek bağlayıcı oranına sahip mastik asfalt kullanılır. Hollanda, Danimarka ve Polonya' da ince daneli TMA kullanılmaktadır [42,43].

Son zamanlarda TMA karışımları binder tabakası olarak kullanılmaya başlanmıştır. ABD ve Almanya' da denemeleri yapılmış ve yorulma performansı bakımından geleneksel karışımlara oranla üstünlük sağladığı ispatlanmıştır. 2013 yılında Karayolları Teknik Şartnamesi yenilenmiş ve bu yeniliklerden bir tanesi de TMA' ın binder tabakasında kullanılabilir olmasıdır.

***Taş mastik asfaltta kullanılan katkıları:*** Alman şartnamesi elyaf, polimer ve silika malzemelere izin vermesine rağmen, sadece selülozik elyaf yoğun olarak kullanılmaktadır. Testler ve denemeler sonucunda, sadece polimer kullanımı ile kesikli-gradasyonlu ve yüksek oranlı bitüm karışımında segregasyonun engellenemediği gözlenmiştir. Yüksek oranlı bitümün süzülmesini engellemek ve homojenlik için elyaf gereklidir. Alman şartnamesine göre bütün TMA asfalt karışımlarında, segregasyonu engellemek için elyaf katkısı kullanılmalı veya bitüm oranı gerekenden daha az uygulanmalıdır. Selülozik elyaflar bitüm ile kimyasal reaksiyona girmez, karışım sıcaklığında etkisizdir ve mükemmel çalışırlar. Almanya'daki TMA karışımlarının %95'inde selülozik elyaf ve geri kalanında ise mineral elyaf veya diğer katkıları kullanılmaktadır. Karayolları teknik şartnamesi de elyaf kullanımında Alman şartnamesindeki Shelenberg süzülme deneyini dikkate almaktadır.

Shelenberg süzülme deneyinde, içinde agrega ağırlığınca %0,3-1,5 elyaf bulunan 1000 gr karışım 170 °C'de 2 saat bir kabın içerisinde bekletildikten sonra boşaltılmakta ve kaba yapışan ağırlık belirlenmektedir. Bu değerin 3 gr'dan fazla olmaması gerekmektedir.

**Taş Mastik Asfaltın Üretimi ve Serilmesi:** TMA, yoğun gradasyonlu beton asfalt karışımlara göre daha fazla kaba agrega içerdiğinden plentte karıştırılması esnasında daha fazla direnç gösterdiğinden daha fazla karışım süresi gerektirmektedir. Şekil 3.13’ te TMA’ nın üretim esnasında her bir bileşenin karıştırma süreleri verilmiştir.



**Şekil 3.13.** Bitüm-emdirilmiş pelet-elyaf ile TMA karışım süreleri

TMA’ da kullanılan bağlayıcı yüksek viskoziteli ve çoğunlukla modifiye bağlayıcı olduğundan karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları da geleneksel asfalt betonu kaplamalardan fazla olmaktadır. TMA’ ın seriminde içindeki bitüm oranı yüksek olsa da, tabakalar arasındaki yapışmanın iyi olması için yapıştırma tabakası (tack coat) uygulanması önerilmektedir. Silindirle sıkıştırma işlemi gecikmeksizin, serici arkasında hemen başlanmalıdır ve mümkün olduğunca sericiye yakın olmalıdır. Sekiz-on ton çelik tekerli silindir kullanılmalıdır. Vibrasyon yapılmaz, eğer gerekirse de en fazla 2 veya 3 defa, sadece ara geçişlerde yapılabilir. Vibrasyon etkisiyle yüzeyde harç fazlalığı görülür ve sonuç olarak başlangıç zamanlarında kayma direnci daha düşüktür. 25 mm’den daha düşük kalınlıktaki ince tabakalarda ve 100 °C’nin altında vibrasyon önerilmez. Bitüm kusmasına neden olabileceğinden dolayı lastik tekerli silindir kullanımı önerilmez. Yüksek bitüm içeriğinden dolayı, başlangıç kayma direnci daha düşük olabilir ve hızlı trafik bölgesinde emniyet problemi oluşturabilir. Bundan dolayı ilk silindir geçişinden sonra, metre kareye 0,5 ila 1,0 kg arasında 1-2 mm boyutunda kırılmış mıcır serilmesi önerilmektedir [41].

### 3.2.3.3 Poroz Asfalt

Poroz asfalt ( Şekil 3.14), kaba agrega oranı yüksek, ince agrega ve filler oranı az, açık gradasyonlu bir karışım tipidir. Hava boşluğu yüzdesi fazla olduğu için suyu içine kolay geçirmekte ve yüzeyinde su birikintiler oluşmamaktadır. Kaplama içine giren su uygun bir drenaj sistemi ile kaplamadan uzaklaştırılmaktadır. Yüzeyinde su kalmadığı için kayma tehlikesi azalmaktadır. Tipik bir poroz asfalt karışımında yaklaşık %73 kaba, %17 ince ve %5 oranında filler bulunmaktadır. İnce agrega filler oranı düşük olduğunda kaba agregalar arası boşluk doldurulmamakta ve boşluk oranı yüksek kaplamalar inşa edilebilmektedir [45].

Poroz asfalt, yüzeyde su birikmesini önleyerek yol güvenliğini, boşluklu yapısı sayesinde trafik gürültüsünün azalmasını sağlamaktadır.



Şekil 3.14. Poroz asfalt

### 3.2.4 . Bitümlü Sıcak Karışımlarda Meydana Gelen Bozulmalar

Dingil yükleri altında çatlamayacak ve plastik deformasyona uğramayacak stabiliteye sahip olması, temel veya alttemel tabakasından oluşacak oturmalara uyum sağlamak açısından yeterli derecede esnek olması ve sürüş güvenliği açısından yeteri kadar sürtünme katsayısına sahip olması gereken kaplamalarda şekil değiştirme, çatlamalar ve ayrışmalar olmak üzere üç tip bozulma meydana gelmektedir. Bu bozulmaların bir kısmı tasarım ve

yapım hatalarından bir kısmı malzeme kusurlarından bir kısmı ise trafik ve çevre şartlarından meydana gelmektedir [46].

#### 3.2.4.1 Şekil Değiştirme

Kaplama yüzeyinin orijinal kota göre değişikliğe uğramasıdır. Temel veya alttemele bağlı olduğu gibi kaplama tabakasının stabilitesine de bağlıdır. Şekil değiştirmeye bağlı bozulmalar aşağıdaki gibi sıralanabilir.

**Oturmalar** (Şekil 3.15); Oturmalar kaplama tabakasına bağlı olmayan alt tabakalarda meydana gelen bozulmaların yüzeye yansımalarıdır. Oturmayı diğer şekil değiştirmelerden ayıran, deforme olmuş kısmın eğrilik yarıçapının büyük olmasıdır. Oturmalar, alt tabaka kalınlıklarının yetersiz olması, doğal zeminde meydana gelen oturmalar, banketlerden gelen yanıl desteğin az olması, yeraltı su seviyesinin yüksek olması ve buna bağlı olarak drenaj sisteminin yetersiz kalması gibi nedenlerden oluşmaktadır. Bu tip bozulmalar ancak alt tabakaların yeterli olarak projelendirilmesi ile önlenir [46].



Şekil 3.15. Oturma

**Yerel Çökmeler** (Şekil 3.16); Yerel çökmeleri oturmadan ayıran kısım bölgesel olmasıdır. Yani yüzey tabakasının, temel veya alttemel tabakasının bazı noktalarda yetersiz sıkışması, drenaj yetersizliğine bağlı olarak bir noktada su birikmesi ve rijitlik kazanmış temelin bir noktada ayrışmaya uğraması yerel çökmelerin nedenleri arasında sayılabilir. Yapım sırasında yeterli kontrol ve özenli işçilik ile yerel çökmeler önlenir [46].





Şekil 3.16. Yerel çökme

**Tekerlek İzi Oluşumu;** Tekerlek izi sıcak asfalt karışımlarında en sık rastlanan bozulma türüdür. Türkiye gibi ağır taşıt trafiğine sahip ve bölgesel olarak sıcak yerlerde tekerlek izi oluşumu sıklıkla görülür. Tekerlek izleri, üstyapıyı oluşturan tabakaların hepsinde veya bir kısmında meydana gelen deformasyonlardan veya trafik tekerrür sayısına bağlı olarak deformasyonların birikmesinden oluşabilir [46]. Şekil 3.17’ de tipik bir tekerlek izi oluşumu gösterilmiştir.



Şekil 3.17. Tekerlek izi oluşumu

**Ondülasyonlar** ( Şekil 3.18); Bitümlü tabakalardaki stabilite yetersizliğinden meydana gelen bozulma türüdür. Ondülasyonlar;

- Bitüm yüzdesinin yüksek olmasına
- İnce agrega oranının yüksek olmasına
- Filler yüzdesinin fazla olmasına
- Yuvarlak malzeme kullanımına

- Yüksek penetrasyonlu bitüm kullanılmasından dolayı oluşmaktadır.

Ondülasyonlara genellikle kavşaklarda, otobüs duraklarında, yaya geçitlerinde ve tırmanma şeritlerinde rastlanılmaktadır [46].



Şekil 3.18. Ondülasyon

***Kabarmalar*** (Şekil 3.19); Zeminde meydana gelen donma-çözünme sonucu kabarmalar meydana gelmektedir. Bu da yol yüzeyinin yer yer yukarı doğru deplasman yapmasına neden olur. Dona hassas zeminlerin bulunduğu durumlarda kaplama altında dona duyarsız malzeme kullanılmalı, zemin iyileştirilmeli ve drenaj ile suyun olası etkileri ortadan kaldırılmalıdır [16].

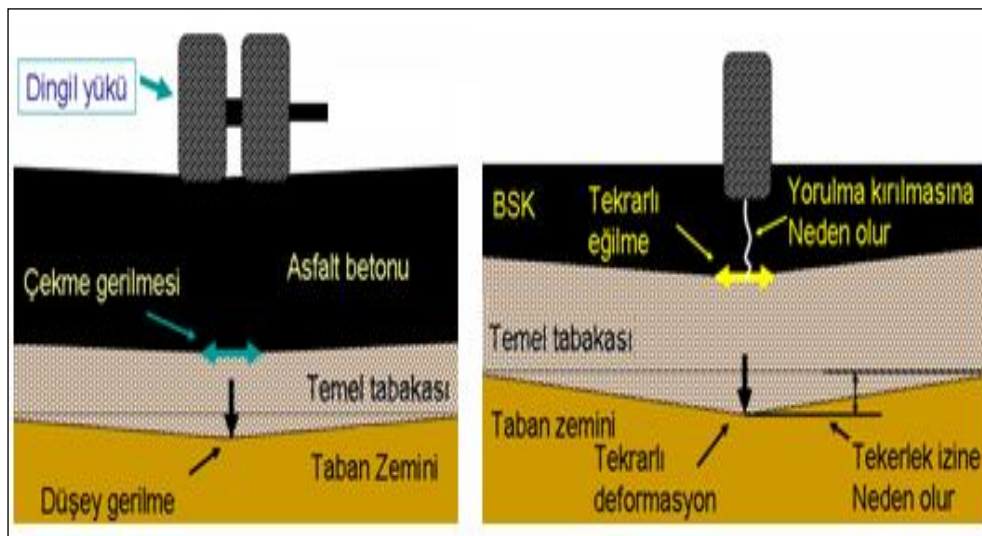


Şekil 3.19. Kabarma

**Yığılmalar;** Kaplamanın üst kısmının sıcak havalarda tekerleklerin mekanik etkisiyle veya sünme yoluyla ötelenerek, yol eksenine dik ya da paralel olarak yığılması olarak tanımlanmaktadır. Yığılmalar, stabilite yetersizliğine, yüksek sıcaklıklara ve astar tabaksının yetersiz olması ile meydana gelen bozulma tipidir. Yüksek stabiliteli karışımlar ve sert bitüm kullanılarak önlenmesi mümkündür [46].

### 3.2.4.2 Çatlaklar

Çatlamlar, kaplama yüzeyinde trafik, çevre ve iklimin etkisi ile çok çeşitli şekilde, genişlikte ve derinlikte oluşan kusurlardır. Çatlaklar genel olarak stabilite, yorulma ve yansıma çatlakları olarak sınıflandırılır. Stabilite çatlakları trafik yüklerinin etkisi ile kaplamanın altında oluşan çekme gerilmelerinin kaplamanın çekme mukavemetini aşması halinde tabakanın alt tarafında başlamakta ve zamanla kaplama yüzeyine çıkması sonucu oluşmaktadır (Şekil 3.20). Yorulma çatlakları ağır trafik yüklerinin tekrürü ile kaplamanın yorulma mukavemetini aşması sonucu oluşmaktadır. Yansıma çatlakları ise bozulmuş bir kaplamanın üzerine yeniden bir kaplama yapıldığında, alttaki tabakada oluşmuş çatlakların üstteki tabakaya kadar ilerlemesidir. Stabilite, yorulma ve yansıma çatlakları genellikle trafik etkisi ile oluşurken, çevre ve iklim etkisiyle oluşan büzülme veya düşük ısı çatlakları ise trafiğin etkisiyle büyüyerek belirgin hale gelir. Esnek kaplamalarda çoğunlukla yorulma çatlakları oluşmaktadır [47].



Şekil 3.20. Tipik bir esnek üstyapısı (a) ve oluşan bozulmalar (b) [48].

**Timsah Sirti Çatlaklar;** Kaplamanın birbirine bağlı bloklar halinde çatlamasıdır. Sıcak karışım asfaltlarda en sık görülen çatlama tipidir.

Aşırı dingil yükleri, kaplamada veya alt tabakalarda meydana gelen hacim değişimleri, aşınma ve binder tabakasının yetersiz kalınlıkta olması, yetersiz drenaj ve alt tabakaların yetersiz olması bu tür bozulmalara yol açar. Karışımın gevrek olması veya düşük sıcaklıklarda esnekliğinin az olması yani kırılğan olması çatlamaı kolaylaştırır [46].

**Yorulma Çatlakları;** Yorulma çatlakları, dingil yüklerinin aynı noktaya birden fazla etki etmesiyle oluşmaktadır. Yani herhangi bir araç geçişinde kaplamaya etki eden gerilme, kaplamanın çekme mukavemetinden düşüktür ve bir kere etki etmesinden çatlamlar oluşmaz. Ancak yüklerin defalarca aynı noktaya etki etmesiyle kalıcı deformasyonlar birikerek kaplamanın çekme mukavemetini aşması ile birlikte çatlamlar başlar ve zamanla tüm kaplamaya yayılabilir.

Kaplamaların yorulma açısından uzun hizmet ömrüne sahip olması için; sıkışmanın iyi olması yani boşluk yüzdesinin az olması, karışımda sert bitüm kullanılması ve bitüm yüzdesinin optimumdan biraz fazla (%1 kadar) olması gerekmektedir [46]. Şekil 3.21' de yüksek ve orta şiddetli yorulma çatlakları verilmiştir.



**Şekil 3.21.** Yüksek ve orta şiddetli yorulma çatlakları

**Büzülme Çatlakları;** Büzülme çatlakları kaplamanın kendi içinde veya alt tabakalarda meydana gelen hacim değişimleri sonucunda oluşan çatlak tipidir. Asfalt yüzdesi yüksek, sert asfalt ile üretilmiş ve ince daneli karışımlarda görülmektedir. Kaplamanın uzun süre kullanılmaması büzülme çatlakları oluşumunu hızlandırır. Son teknolojilerle üretilen asfalt kaplamalarda bu tip bozulmaya fazla rastlanmaz [46].

**Kenar Çatlakları** (Şekil 3.22); Kenar çatlakları, genellikle banketlerin yeteri kadar yanal destek sağlamaması sonucu oluşan çatlak tipidir. Drenaj yetersizliği, don etkisi,



banketlerin büzülmesi ve kaplama kenarındaki bitki örtüsü de bu tür çatlaklara neden olabilir.



Şekil 3.22. Kenar çatlağı oluşumu

**Derz Çatlakları;** İki kaplama şeridi arasında oluşan çatlaklardır. Genellikle yapım sırasında ikinci şerit serilirken yeterli bindirmenin yapılmaması ile zamanla iki şerit birbirinden ayrılır. Kaplama ile banket arasında da oluşabilmektedir.

**Enine Çatlaklar** (Şekil 3.23); Yol eksenine dik olarak oluşan çatlaklardır. Yukarıda açıklanan çatlak oluşum sebeplerine ek olarak sericinin uzun süre duraklaması ve ani sıcaklık değişimlerinden dolayı kaplamada meydana gelen gerilmelerden kaynaklanan çatlak tipidir [46].

Plent kapasitesi, taşıma mesafesi ve serim hızı arasında iyi bir koordinasyon ile enine çatlaklar önlenebilir [46].



Şekil 3.23. Enine çatlaklar

**Yansıma Çatlakları;** Genellikle rijit kaplamalar üzerine takviye tabakası olarak inşa edilen bitümlü kaplamalarda görülmektedir. Beton kaplamada bulunan enine ve boyuna derzler ve diğer çatlaklar bitümlü kaplamaya yansır. Takviye tabaka kalınlığının az olması çatlak oluşumunu kolaylaştırır. Yansıma çatlaklarının önlenmesi için takviye tabakasından önce var olan çatlaklar onarılmalıdır [46]. Şekil 3.24’ te yansıma çatlağına ait bir görüntü verilmiştir.



**Şekil 3.24.** Yansıma çatlağı

### 3.2.4.3 Ayrışmalar

Agrega danelerinin iklim ve trafiğin etkisiyle kaplamadan kopmasıdır. Ayrışmanın nedenleri;

- Bağlayıcın mekanik etki ile kopması
- Kaplama kalınlığının az olması
- Drenaj yetersizliği
- Nemli ve soğuk havada yapım
- Yapım sırasında segregasyon meydana gelmesi
- Su ve kil etkisi ile soyulma
- Yetersiz sıkıştırma

Ayrışma bu faktörlerin bir veya bir kaçının bir arada bulunması halinde trafiğin mekanik etkisi ile başlar [46].

**Oyuklar** (Şekil 3.25); Yaklaşık 25-75 cm çapında dairesel olarak meydana gelen oluklardır. Ağır taşıt trafiğinin yoğun olduğu tırmanma şeritlerinde sıklıkla görülmektedir. Timsah sırtı çatlakların bakımının zamanında yapılmaması oyukların oluşmasına neden olabilir.

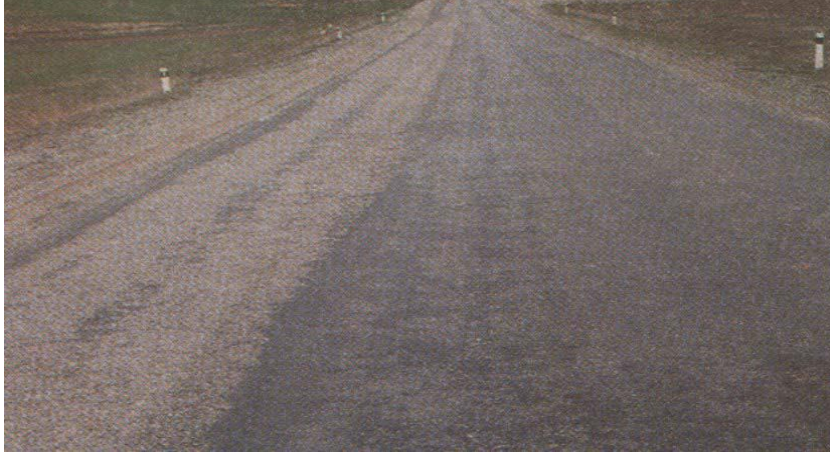
Kaliteli bitüm ve karışım kullanılması, trafik yoğunluğuna uygun üst yapı inşası, drenaj ve özellikle yeterli sıkıştırma ile oyuklar önenebilir [46].



Şekil 3.25. Oyuk

**Sökülmeler** (Şekil 3.26); Agrega tanelerinin yerlerinden ayrılarak kaplama yüzeyinden aşağıya veya kenardan içeri doğru gelişen ayrışma tipidir. Sökülme önce ince agreganın yüzeyden kopması ile başlar ve zamanla iri agregalar da sökülür. Asfalt betonunun erozyonu olarak adlandırılır.

Sökülmenin nedenleri; yetersiz sıkıştırma, yağışlı ve soğuk havada yapım, kirliliği, kırıntılı agreganın kullanımı, bitüm yüzdesinin az olması ve karışımın gereğinden fazla olması şeklinde sıralanabilir [16].



Şekil 3.26. Sökülme

**Tabaka Halinde Sökülme;** Kaplama tabakasının yeterli kalınlıkta olmaması, alt tabaka ile yüzey arasındaki yapıştırmanın az olması, trafiğin mekanik etkisiyle agregaların bitüm filminden ayrılması, stabilite düşüklüğü, filler yüzdesinin az veya fazla olması sonucunda oluşan ayrışma tipidir [16,46].

**Soyulmalar;** Soyulma, agrega ile asfalt bağlayıcı arasındaki adezyon bağının zayıflamasından dolayı bitümlü sıcak karışımların zamanla yapısının bozulması olarak tarif edilir. Soyulma genellikle asfalt kaplamanın alt tabakalarından başlayıp yukarı doğru hareket eder ve agrega danelerini saran ince asfalt filminin su, kil ve trafiğin mekanik etkisiyle agregadan ayrılması ve dolayısı ile agrega danelerinin çıplak kalması olayıdır. Soyulmada rol alan önemli faktörler, agrega ve bağlayıcının fiziksel ve kimyasal özellikleri, aralarındaki etkileşimi, üstyapı tasarımı, karışım tasarımı, serim ve sıkıştırma, yüzey ve alt tabakalardaki drenaj ve trafik olarak sıralanabilir. Bu tür bozulmalarda en önemli faktör, agrega ve asfalt ara yüzeyinde su ve nemin olmasıdır. Kuru ve temiz agrega kullanımı, iyi bağlayıcılık karakteri olan asfalt, yüksek asfalt oranı ve yüksek viskoziteli (sert bitüm) asfalt kullanımı soyulmayı azaltır [47]. Şekil 3.27' de agrega soyulmasına bir örnek verilmiştir.





Şekil 3.27. Soyulma

**Kusma;** Karışım içindeki bitümün sıcaklığın etkisiyle zamanla yüzeye çıkması ve yüzeydeki agregaları tamamen sararak ince bir asfalt filmi oluşturması olayıdır. Kaplamin sürtünme katsayısının düşmesine neden olur. Genellikle bitüm yüzdesi yüksek karışım türlerinde ve sıcak havalarda meydana gelmektedir [46]. Kusma olayı şekil 3.28’ de görülmektedir.

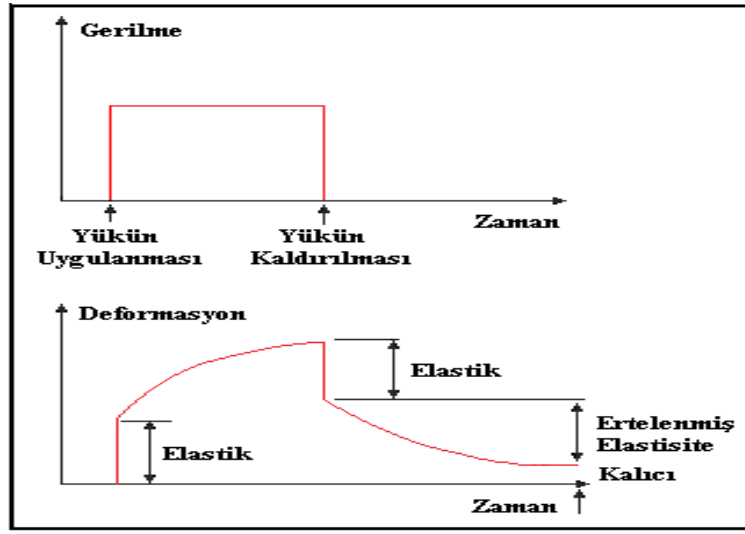


Şekil 3.28. Kusma

### 3.2.5 Bitüm ve Karışımın Modifikasyonu

Bitüm, reolojik yapı olarak viskoelastik ve termoplastik özellik göstermektedir. Viskoelastik malzemeler, yüksek hızlı yüklemelerde elastik davranış ve yüksek mukavemet gösterirken, düşük hızlı yüklemelerde viskoz davranış ve düşük mukavemet gösterirler. Termoplastik malzemeler ise yüksek sıcaklıklarda düşük mukavemet, düşük

sıcaklıklarda ise yüksek mukavemet gösterirler [49]. Başta çatlama ve kalıcı deformasyon dayanımı olmak üzere, yol performansının birçok parametresinde büyük rol oynayan bitüm, asfalt karışımların da viskoelastik özellik göstermesine sebep olmaktadır. Genel olarak, kaplama yapısında oluşan deformasyon miktarı, yükleme süresine ve sıcaklık değerine bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Şekil 3.29 ve Şekil 3.30’da, esnek kaplamalara uygulanan yük sonucunda oluşan gerilme ve deformasyonların zamanla değişimi görülmektedir [50].

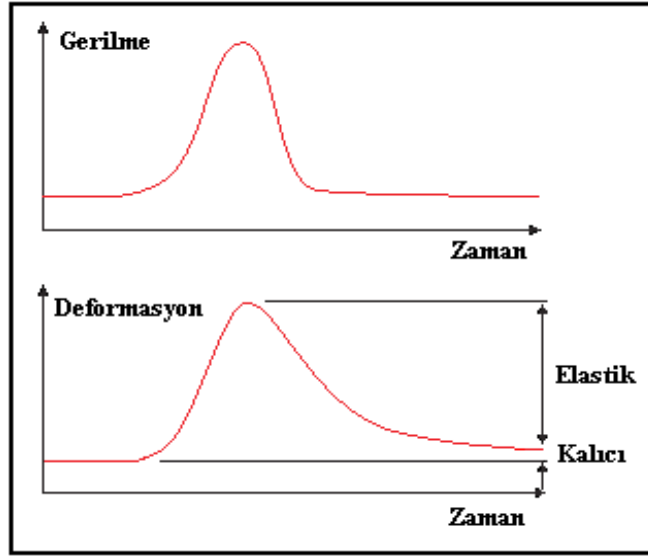


Şekil 3.29. Bitümün statik yükler karşısındaki davranışı [50].

Şekil 3.29’ da görüldüğü gibi; yükün etki etmesiyle oluşan ani deformasyonu, yük kaldırılınca kadar azalarak artmaktadır. Zamana bağlı olarak deformasyonda meydana gelen bu değişim malzemenin viskoelastik özelliğinden kaynaklanmaktadır. Yükün kaldırılmasıyla elastik deformasyon ani olarak geri dönmekte ve zamanla ‘ertelenmiş elastisite’ adı verilen bir kısım geri dönüş daha meydana gelmektedir. Sonuçta, geri kazanılmayan ve doğrudan viskoz davranışın sebep olduğu bir miktar kalıcı deformasyon meydana gelmektedir.

Şekil 3.30’ da, bitümlü bağlayıcıların hareketli trafik yüklerine karşı davranışı görülmektedir. Deformasyon - zaman grafiğinde, her ne kadar yükün etkisinden önce ve sonra deformasyon değerleri aynı gibi görülse de çok küçük miktarlarda da olsa kalıcı deformasyonlar meydana gelmektedir. Sadece bir tekerlek yükü için tanımlanan küçük deformasyonlar, milyonlarca tekerlek yükü tekrürü sonucunda kaplama yapısında büyük

bozulmalara sebep olmaktadır. Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM), bitümlü sıcak karışım kaplama tabakalarında yaygın olarak görülen tekerlek izi ve çatlak şeklindeki bozulmaları geciktirmek ve kaymaya karşı direnci arttırarak trafik güvenliğini sağlamak amacıyla, 'Modifiye Bitüm Teknik Şartnamesi'ni hazırlamıştır. KGM tarafından belirtilen Modifiye Bitüm Teknik Şartname Limitleri Tablo 3.6' da verilmiştir.



Şekil 3.30. Bitümün dinamik yükler karşısındaki davranışı [50].

Tablo 3.6. Modifiye bitümün fiziksel özellikleri [8].

Sıra No	DENEY ADI	STANDARDI	BİRİMİ	PMB 58-28	PMB 64-28	PMB 70-16	PMB 70-22	PMB 70-28	PMB 76-16	PMB 76-22	PMB 76-28	PMB 82-16	PMB 82-22	
1	PENETRASYON (25°C,150g,5sn.)	TS EN 1426	0,1mm	90-150 (8)	40-100 (5)	45-80 (4)	45-80 (4)	45-80 (4)	25-55 (3)	25-55 (3)	25-55 (3)	25-55 (3)	25-55 (3)	
2	YUMUŞAMA NOKTASI	TS EN 1427	°C	≥ 45 (8)	≥ 50 (8)	≥ 60 (6)	≥ 60 (6)	≥ 55 (7)	≥ 65 (5)	≥ 65 (5)	≥ 60 (6)	≥ 70 (4)	≥ 70 (4)	
3	KUVVET ÖLÇÜMLÜ DÜKTİLİTE <sup>a</sup> (25°C, 5cm/dk)	TS EN 13589	J	≥ 0,5 (11)	≥ 0,5 (11)	≥ 0,5 (11)	≥ 0,5 (11)	≥ 0,5 (11)	≥ 0,5 (11)	≥ 0,5 (11)	≥ 0,5 (11)	≥ 0,5 (11)	≥ 0,5 (11)	
4	ELASTİK GERİ DÖNME <sup>b</sup> (25°C)	TS EN 13398	%	≥ 80 (2)	≥ 80 (2)	≥ 60 (4)	≥ 70 (3)	≥ 80 (2)	≥ 60 (4)	≥ 70 (3)	≥ 80 (2)	≥ 60 (4)	≥ 70 (3)	
5	PARLAMA NOKTASI	TS EN ISO 2592	°C	≥ 220 (4)	≥ 220 (4)	≥ 220 (4)	≥ 220 (4)	≥ 220 (4)	≥ 220 (4)	≥ 220 (4)	≥ 220 (4)	≥ 220 (4)	≥ 220 (4)	
6	ÖZGÜL AĞIRLIK	TS EN 15326	g/cm <sup>3</sup>	1,0-1,1										
7	DİNAMİK KESME REOMETRESİ (DSR) (G <sup>*</sup> /sinδ >1kpa)	Yenilme Sıcaklığı	TS EN 14770	°C	≥ 58	≥ 64	≥ 70	≥ 70	≥ 70	≥ 76	≥ 76	≥ 76	≥ 82	≥ 82
8	DEPOLAMA STABİLİTESİ <sup>c</sup>	TS EN 13399												
8.1	YUMUŞAMA NOKTASI FARKI	TS EN 1427	°C	≤ 5 (2)	≤ 5 (2)	≤ 5 (2)	≤ 5 (2)	≤ 5 (2)	≤ 5 (2)	≤ 5 (2)	≤ 5 (2)	≤ 5 (2)	≤ 5 (2)	
8.2	PENETRASYON FARKI	TS EN 1426	0,1mm	≤ 13 (3)	≤ 13 (3)	≤ 13 (3)	≤ 13 (3)	≤ 13 (3)	≤ 9 (2)	≤ 9 (2)	≤ 9 (2)	≤ 9 (2)	≤ 9 (2)	
9	DÖNMELİ İNCE FİLM ETÜVÜ DENEYİ <sup>d</sup>	TS EN 12607-1												
9.1	KÜTLE DEĞİŞİMİ		%	≤ 1 (5)	≤ 1 (5)	≤ 1 (5)	≤ 1 (5)	≤ 1 (5)	≤ 0,8 (4)	≤ 0,8 (4)	≤ 0,8 (4)	≤ 0,5 (3)	≤ 0,5 (3)	
9.2	YUMUŞAMA NOKTASINDAKİ ARTMA	TS EN 1427	°C	≤ 8 (2)	≤ 8 (2)	≤ 8 (2)	≤ 8 (2)	≤ 8 (2)	≤ 8 (2)	≤ 8 (2)	≤ 8 (2)	≤ 8 (2)	≤ 8 (2)	
9.3	YUMUŞAMA NOKTASINDAKİ AZALMA		°C	≤ 5 (3)	≤ 5 (3)	≤ 5 (3)	≤ 5 (3)	≤ 5 (3)	≤ 5 (3)	≤ 5 (3)	≤ 5 (3)	≤ 2 (2)	≤ 2 (2)	
9.4	KALICI PENETRASYON	TS EN 1426	%	≥ 50 (5)	≥ 50 (5)	≥ 50 (5)	≥ 50 (5)	≥ 50 (5)	≥ 45 (4)	≥ 45 (4)	≥ 45 (4)	≥ 40 (3)	≥ 40 (3)	
9.5	DİNAMİK KESME REOMETRESİ (DSR) (G <sup>*</sup> /sinδ >2,2kpa)	Yenilme Sıcaklığı	TS EN 14770	°C	≥ 58	≥ 64	≥ 70	≥ 70	≥ 70	≥ 76	≥ 76	≥ 76	≥ 82	≥ 82
10	RTFOT+PAV İle Yaşlandırılmış Modifiye Bitüme Yapılan Deneyler	TS EN 14769												
10.1	DSR (G <sup>*</sup> /sinδ <5000kpa)	Yenilme Sıcaklığı	TS EN 14770	°C	≤ 19	≤ 22	≤ 31	≤ 28	≤ 25	≤ 34	≤ 31	≤ 28	≤ 37	≤ 34
10.2	KIRIŞ EĞME REOMETRESİ (BBR) Eğilme-Sünme Sertliği (S≤300 MPa, m≥0,300)	Sıcaklık	TS EN 14771	°C	≤ -18	≤ -18	≤ -6	≤ -12	≤ -18	≤ -6	≤ -12	≤ -18	≤ -6	≤ -12

<sup>a</sup> Bu koşul gerekli olduğunda aranacaktır.

<sup>b</sup> Sadece elastomerik katkılarda aranacaktır.

<sup>c</sup> Modifiye bitüm depolanmadan kullanılacaksa, depolama stabilitesi deneyinin yapılması zorunlu değildir.

<sup>d</sup> Yüksek viskoziteli modifiye bitümlerde RTFO deneyi 163 °C 'den daha yüksek (180 °C 'yi geçmeyen) sıcaklıkta yapılabilecektir.

TFO deneyi idarenin izni ile RTFO yerine kullanılabilir.

NOT: 1,2,4,9.1,9.2,9.4 sıra nolu deneylerin şantiyede yapılması zorunludur. Prantez içindeki ifadeler TS EN 14023 standardındaki o değere ait sınıfı göstermektedir.

Ayrıca, kullanılan modifiye bitümden yılda en az iki kez numune alınarak tabloda belirtilen tüm deneyler yapılacaktır.

Katkı maddeleri, kaplamanın performansını artırmak, servis ömrünü uzatmak ve oluşabilecek bozulmaları engellemek veya geciktirmek amacıyla kullanılmaktadır. Modifikasyon;

- Katkı maddesinin bitüme katılması (modifiye bitüm, yaş proses)

Katkı maddesinin doğrudan plentte karışıma ilave edilmesi (modifiye karışım, kuru proses) şeklinde yapılabilmektedir.

Bitümün modifiye edilmesinde, modifiye bitüm üzerinde çeşitli standart test yöntemleri uygulayarak bağlayıcı özelliklerindeki değişikliklerin tespit edilmesi mümkündür. Bu sayede, modifiye bitümün özelliklerinin belirlenmesi ve değerlendirilmesi yapılabilmektedir. Bitümün modifiye edilmesi yönteminde, bu işlem için genellikle ek ekipmanlar gerekmekte, hazırlanan modifiye bitümün depolanması ve taşınması gibi sorunlar ortaya çıkmaktadır [15].

Karışımın modifiye edilmesinde ise, katkı maddesi asfalt plentinde karışıma katılabildiğinden ek karıştırma ekipmanı gerekmemekte, depolama, taşıma gibi sorunlarla karşılaşılmamaktadır. Ancak bu durumda da karışımdan, özelliği değişen bitümü alarak özelliklerinin belirlenmesi ve değerlendirilmesi yapılamamaktadır.

Bilindiği gibi, bağlayıcı özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan standart deney yöntemleri, karışım özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan deney yöntemlerine göre daha kısa sürede yapılabilmektedir. Karışıma yönelik deneylerde, daha uzun sürelerle, daha fazla işlemlere ve daha kapsamlı deney ekipmanlarına gereksinim duyulmaktadır [15].

Bitümlü sıcak karışımlarda kullanılan katkı maddeleri çeşitli şekillerde sınıflandırılabilir. Katkı maddesinin tipini, örneklerini ve katkı maddesinin kıvamına etkisini gösteren genel bir sınıflandırma Tablo 3.7' de verilmiştir [15].

Kullanımı oldukça artan modifiye bitümler ve karışımlar konusundaki çalışmalarda son yıllarda polimerler temel alınarak; polimer olan katkı maddeleri ve polimer olmayan katkı maddeleri şeklinde sınıflandırma yapılmaktadır. Bitüm ve bitümlü karışımların modifikasyonunda kullanılan katkı maddeleri ve etki ettikleri yapısal bozulma şekilleri Tablo 3.8' de gösterilmiştir.

**Tablo 3.7.** BSK katkı maddelerinin genel sınıflandırılması [15].

Tip	Özellikler	Modifiyenin Bağlayıcı Kıvamına Etkisi	
1. Filler	<ul style="list-style-type: none"><li>• Mineral Filler Taş Tozu Kireç Portland Çimentosu Uçucu Kül</li><li>• Karbon Siyahı</li><li>• Sülfür</li></ul>	Sertleştirme	
2. Genleştirici (Ekstender)	<ul style="list-style-type: none"><li>• Sülfür</li><li>• Lignin (Odun Özü)</li></ul>	Sertleştirme	
3. Kauçuk a. Doğal Lateks b. Yapay Lateks c. Blok Kopolimer d. İşlenmiş Kauçuk	POLİMERLER	-	
4. Plastik		<ul style="list-style-type: none"><li>• Polietilen</li><li>• Polipropilen</li><li>• EVA</li><li>• PVC</li></ul>	Sertleştirme
5. Bileşim		• 3 ve 4'deki polimerlerin karışımı	-
6. Fiber	<ul style="list-style-type: none"><li>• Doğal: Asbest Taş Yünü</li><li>• Yapay: Polipropilen Polyester Fiberglas</li></ul>	Sertleştirme	
7. Oksidan	<ul style="list-style-type: none"><li>• Manganez Tuzu</li></ul>	Sertleştirme	
8. Antioksidan	<ul style="list-style-type: none"><li>• Kurşun Karışımları</li><li>• Karbon</li><li>• Kalsiyum Tuzu</li></ul>	Yumuşatma	
9. Hidrokarbon	<ul style="list-style-type: none"><li>• Yeniden Kullanma ve Gençleştirme Yağları</li><li>• Doğal Asfaltlar</li></ul>	Yumuşatma ve Sertleştirme	
10. Soyulma Önleyici	<ul style="list-style-type: none"><li>• Aminler</li><li>• Kireç</li></ul>	Yumuşatma	

**Tablo 3.8.** Farklı tipteki katkı maddelerinin sağladıkları faydalar [51].

Katkı türü	Sınıfı	Bozulma türlerine karşı faydaları				
		Kalıcı deformasyon	Yorulma çatlağı	Düşük ısı çatlağı	Nem hasarı	Yaşlanma
Fillerler	Karbon siyahı	X				X
	Mineral: <i>Hidrate kireç</i>	X				X
	<i>Uçucu kül</i>	X				
	<i>Portlant çimentosu</i>	X				
Genleştiriciler	Sülfür	X	X	X		
	Ağaç lignini				X	
Polimerler- Elastomerler	Stiren butadien di-blok SB	X		X	X	
	Stiren butadien tri-blok/radyalblok(SBS)	X	X	X		
	Stiren butadien kauçuk lateks SBR	X		X		
	Polikloropiren lateks	X	X			
Polimerler- Plastomerler	Doğal kauçuk	X				
	Etilen vinil asetat (EVA)	X	X			
	Etilen akrilat (EA)	X				
	Poliisobütilen	X				
	Polietilen (düşük ve yüksek yoğunluklu)	X		X		
Öğütülmüş lastik	Polipropilen	X				
	Farklı boyutlar, işlemler ve aşamalar	X	X	X		
Oksidanlar	Manganez bileşenleri	X				
Hidrokarbonlar	Aromatikler			X		
	Parafinikler/balmumu			X		
	Doğal Asfaltlar: <i>Trinidad</i>	X	X	X	X	
Soyulma önleyiciler	<i>Gilsonit</i>	X			X	
	Aminler: <i>Amidoaminler</i>				X	
	<i>Poliaminler</i>				X	
	Poliamidler				X	
Fiberler	Hidrate kireç				X	
	Organo metalikler				X	
	Polipropilen	X	X	X		
	Polyester	X		X		
	Fiberglas					
	Çelik	X	X	X		
Antioksidanlar	Güçlendirme	X	X	X		
	Doğal: <i>Selüloz</i>	X				
	<i>Mineral</i>	X				
	Karbamatlar: <i>Kurşun</i>			X		X
Fenoller	<i>Çinko</i>			X		X
	Karbon siyahı	X				X
	Kalsiyum tuzları					X
	Hidrate kireç				X	X
	Fenoller					X
	Aminler				X	X

## **4. BİTÜMLÜ KARIŞIMLARIN FİZİKSEL VE MEKANİK ÖZELLİKLERİ**

Fiziksel ve mekanik özelliklerin tümünü ideal olarak sağlayabilecek bitümlü karışım elde etmek bugün için hemen hemen mümkün değildir. Ancak karışımların yapılabilmesi ve uygulamada ideal bitümlü kaplamaların elde edilebilmesi için bu özelliklerin çok iyi bilinmesi gereklidir [52].

### **4.1 Stabilite**

Stabilite, kaplamaların trafik yükü altında oluşacak deformasyonlara karşı gösterdiği direnç olarak tarif edilmektedir. Düşük stabiliteli kaplamalarda deformasyon fazla olmaktadır. Ancak sıcak karışım asfaltlarda düşük stabilitenin istenmediği kadar yüksek stabilite de istenmez, çünkü, stabilitesi yüksek karışımlar rijit bir davranış sergilerler. Kaplamadan beklenen performans trafik yükleri altından esnek bir davranış sergilemesidir. Rijit davranan kaplamalarda çatlak oluşumu görülmektedir.

Asfalt karışımlarının stabilitesini, statik veya yavaş hızlarda agregalar arası sürtünme direnci, yüksek hızlarda ise asfaltın kohezyonu ve viskozluğu belirler. Agregalar arası sürtünme direnci ne kadar yüksek olursa deformasyonlara karşı gösterilen direnç de o kadar yüksek olacaktır. Özellikle düşük taşıt hızlarında ve yüksek sıcaklıklarda stabilizeyi tamamen agregalar arası içsel sürtünme direnci sağlamaktadır [47]. Taş mastik asfaltın gradasyonu %65-75 oranında iri agregadan oluşmasından dolayı agregalar arası içsel sürtünme direnci yüksektir. Bu yüzden taş mastik asfaltın yüksek sıcaklık ve düşük taşıt hızında stabilitesi yüksektir. Günümüzde aşınma tabakalarının büyük bir çoğunlu taş mastik olarak imal edilmektedir.

### **4.2 Yorulma Mukavemeti**

Sıcak karışım asfaltların yorulma mukavemeti, kaplamada çatlama meydana gelmeden tekrar eden yükler altında kalıcı deformasyonlar oluşmadan eğilebilmesidir. Yani kaplamada meydana gelen çekme gerilmeleri altında yorulma çatlakları oluşmadan ne kadar direnç gösterebildiğinin bir ölçüsüdür. Yorulma mukavemeti;

- Gradasyon ve yoğunluk arttıkça



- Bitüm penetrasyonu arttıkça
  - Bitüm yüzdesi arttıkça
  - Rijitlik arttıkça
  - Eğilme gerilmesi azaldıkça
  - Yeterli sıkışma yapıldıkça
- artış göstermektedir [47].

### 4.3 Rijitlik

Sıcak asfalt karışımlar, viskoelastik ve termoplastik malzemeler olduğundan dolayı mekanik özelliklerini belirlemek için “Rijitlik Modülü” kullanılmaktadır. Rijitlik modülü ( $S_m$ ), elastik malzemelerin elastikiyet modülüne benzemekle beraber ısı ve yükleme hızına bağlı olarak aşağıda belirtilen (4.1) bağıntısı ile saptanır.

$$S_{m(t,i)} = \sigma / \varepsilon \quad (4.1)$$

Burada  $\sigma$ ; gerilme,  $\varepsilon$ ; şekil değiştirme,  $i$ ; ısı,  $t$  yükleme süresi veya hızı olup karışıma giren malzemelerin temel özellikleri ikinci derecede rol oynamaktadır. Rijitlik, bitümlü sıcak karışımların yükleme süresi veya hızı ve ısı etkisi altında gerilme ve deformasyon arasındaki ilişkinin ifadesidir. Yani rijitlik genel olarak yükleme süresi azaldıkça veya yükleme hızı arttıkça, ısı azaldıkça, karışımın yoğunluğu arttıkça, asfaltın viskozitesi arttıkça artar [47]. Bitümlü sıcak karışımın rijitliğinin sıcaklık veya yükleme süresi ile değişimi ve rijitliği etkileyen faktörler Şekil 4.1’de görülmektedir.



Şekil 4.1. Sıcaklık veya Yükleme Süresinin bir Fonksiyonu Olarak Karışım Rijitliği [50].

#### 4.4 İşlenebilirlik

İşlenebilirlik, karışımdaki agrega danelerinin yer değiştirmeye karşı gösterdiği dirençtir. Bu nedenle agreganın gradasyonu, biçimi, kırılmışlığı, yüzey alanı, yüzey yapısı gibi hususlar ile birlikte bitümün viskozluğu gibi özellikler karışımın işlenebilirliğinde önemlidir. Dolayısıyla bitümün kohezyonu (filler miktarından kaynaklanan), agregalar arası içsel sürtünme açısı ve karışımın viskozluğu (filler miktarından ve bitümün viskozluğundan kaynaklana) agrega danelerinin yer değiştirme direncine yani işlenebilirliğe etki etmektedir [47].

#### 4.5 Nem Hassasiyeti

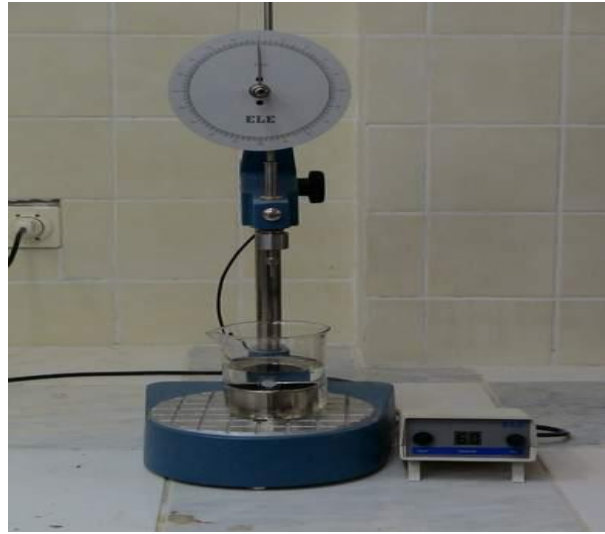
Esnek kaplamalarda sistemde suyun yada nemin olması, asfalt-agrega karışımı arasındaki bağı zayıflatarak adezyonu, asfalt bağlayıcı bünyesinde değişiklikler yaparak kohezyonu etkilemektedir. Asfalt agrega arasındaki yapışmanın kaybolması ve/veya bağlayıcının özelliklerinin değişmesi bitümlü karışımlarda çok önemli mühendislik özelliklerinin değişmesine ve üst yapının bozulmasına neden olmaktadır. Trafik miktarı, dingil yükleri ve lastik basınçlarının artması, agrega ve bağlayıcı özelliklerinin değişmesi, yapım ve tasarım, üst yapıda meydana gelen bozulmalarda etkili olan parametrelerdir. Nem hassasiyeti ise bütün bu faktörlerin neden olduğu bozulmaların şiddetini artırmaktadır. Nem hassasiyetinin soyulma, tekerlek izi oluşumu ve yorulma ömrü üzerinde önemli etkileri vardır. Bitümün yaşlanması ve bağlayıcı oranının az olmasının yanı sıra nem, asfaltı agregadan ayırmakta ve soyulmaya neden olmaktadır. Nemin tekerlek izi oluşumuna etkisi ise BSK'nın dayanımını düşürmesinden dolayı meydana gelmektedir. Ayrıca tekerlek izi oluşumu esnasında kumalar meydana gelmekte ve soyulma da gerçekleşmektedir. Yorulma, tekrarlı yükler ve dolayısı ile meydana gelen yüksek gerilme ve şekil değiştirmeler ile ilgilidir. BSK'nın rijitliğinde meydana gelen azalma BSK'ların yorulma kapasitesini aşacak yüksek gerilmelere ve şekil değiştirmelere neden olur. Nem, bu rijitliğin azalmasına ve tekrarlı trafik yüklerinin meydana getirdiği gibi yüksek gerilmelere neden olmaktadır [53].

## 5. ÇALIŞMADA UYGULANAN DENEY YÖNTEMLERİ

### 5.1 Bitümlü Bağlayıcılar Üzerine Uygulanan Deney Yöntemleri

#### 5.1.1 Penetrasyon Deneyi (TS 118 EN 1426)

Penetrasyon deneyi, bitümün sertliğini veya kıvamını belirlemek amacıyla yapılmaktadır. Standart penetrasyon deneyi, 100 gr. ağırlığındaki bir iğnenin 25°C sıcaklıkta ve 5 saniye süreyle bitüm içerisinde kat ettiği düşey mesafe olarak tanımlanmaktadır. Penetrasyonun birimi  $10^{-1}$  mm.dir. Bitümün penetrasyon değeri kıvamla ters orantılıdır. Penetrasyon deney aleti Şekil 5.1.'de gösterilmiştir.



Şekil 5.1. Penetrasyon deney aleti

#### 5.1.2 Yumuşama Noktası Deneyi (TS 118 EN 1427)

Bitümün yumuşama sıcaklığını tespit etmek amacıyla yapılan bir deneydir. Bu deneyde, bitüm doldurulmuş standart halka düzeneğe yerleştirilmekte ve bitüm üzerine 2,5 cm yükseklikten standart bir bilye bırakılmaktadır. Deney başlangıç sıcaklığı 5°C'dir ve deney

boyunca sıcaklık dakikada 5°C arttırılmaktadır. Yumuşama noktası değeri, bitümlü malzemenin tabana değdiği anda termometrenin gösterdiği değerdir. Yumuşama noktasının 80 °C' nin üzerine çıkması durumunda deneyde su yerine gliserin kullanılmalıdır ve deneyin başlangıç sıcaklığı 32 °C' dir. Yumuşama noktası yüksek bağlayıcının kullanıldığı karışımlarda tekerlek etkisiyle oluşan deformasyonların daha az olduğu görülmektedir. Tekerlek izine hassas karışımlar için yumuşama noktası sıcaklığı tekerlek iziyle iyi bir korelasyon sağladığı ve yumuşama noktasındaki 5-6 °C lik bir azalmanın %20 daha fazla tekerlek izine yol açtığı belirtilmektedir [54]. Otomatik yumuşama noktası deney aleti Şekil 5.2.'de gösterilmiştir.



Şekil 5.2. Yumuşama noktası deney aleti

### 5.1.3 Dinamik Kayma Reometresi Deneyi

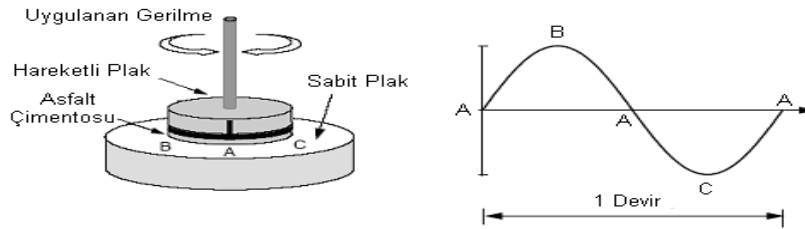
Dinamik kayma reometresi (DSR) deneyi (Şekil 5.3), bağlayıcının kompleks kayma modülü ( $G^*$ ) ve faz açısını ( $\delta$ ) belirleyerek viskoz ve elastik davranışını karakterize etmektedir.  $G^*$ , tekerrür eden kayma gerilmelerinin oluşturduğu deformasyonlara karşı bağlayıcının gösterdiği toplam direncin göstergesidir. Hem  $G^*$  hem de  $\delta$  değerleri asfalt çimentosunun sahip olduğu ısı ve yükleme hızı ile önemli ölçüde değişmektedir [55,56].

DSR deneyinde, bağlayıcılar Şekil 5.4'de görüldüğü gibi sabit alt plak ve hareketli üst plak arasına yerleştirilmektedir. Hareketli üst plaktaki A noktası, B noktasına gitmekte geri dönerek tekrar A noktasına geldikten sonra C noktasına gitmektedir. Daha sonrada tekrar

A noktasına ulaşmaktadır. Bu döngüye bir devir denilmektedir ve deney boyunca tekrarlanmaktadır. Deneyde ortam şartlarını yansıtması amacıyla ön koşullandırma yapılmakta ve daha sonra 10 devirlik standart deney uygulanmaktadır.



Şekil 5.3. Dinamik Kayma reometresi (DSR)

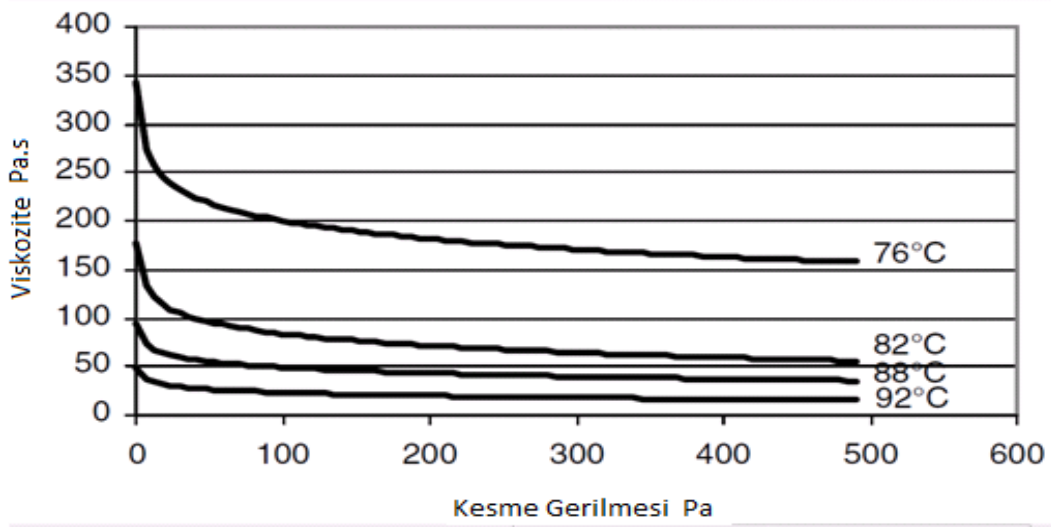


Şekil 5.4. DSR deneyinde deformasyon yönleri

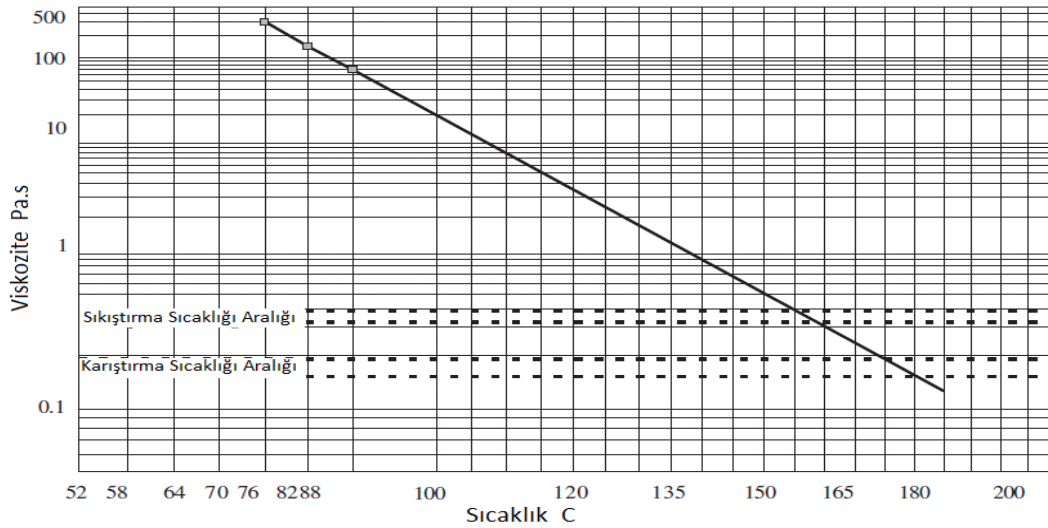
Ayrıca, DSR deney aleti ile sabit kesme viskozitesi ve faz açısı yöntemi kullanılarak bağlayıcıların karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları tespit edilebilmektedir.

Sabit kesme viskozitesi yönteminde dinamik kesme reometresi (DSR) aleti kullanılmaktadır. Test 500 mikron açıklığa sahip 25 mm'lik paralel plaklarla yapılmaktadır. 500 Pa gerilme seviyesinden sonra modifiye bağlayıcıların viskozitesinde önemli bir değişikliğin olmadığını tespit edilmesinden dolayı (Şekil 5.5), testte 500 Pa sabit gerilme seviyesinde 76, 82 ve 88 °C'lerde viskoziteler tespit edilmekte ve logaritmik ölçekte sıcaklığa karşı çizilen viskozite grafiğinden karıştırma ve sıkıştırma sıcaklığı

sırasıyla  $0,17 \pm 0,02$  Pa.s ve  $0,35 \pm 0,03$  Pa.s viskozitelere karşılık gelen sıcaklıklar olarak belirlenmektedir (Şekil 5.6) [57].



Şekil 5.5. Sabit kesme viskozitesi yönteminde kesme gerilme aralığı [58].



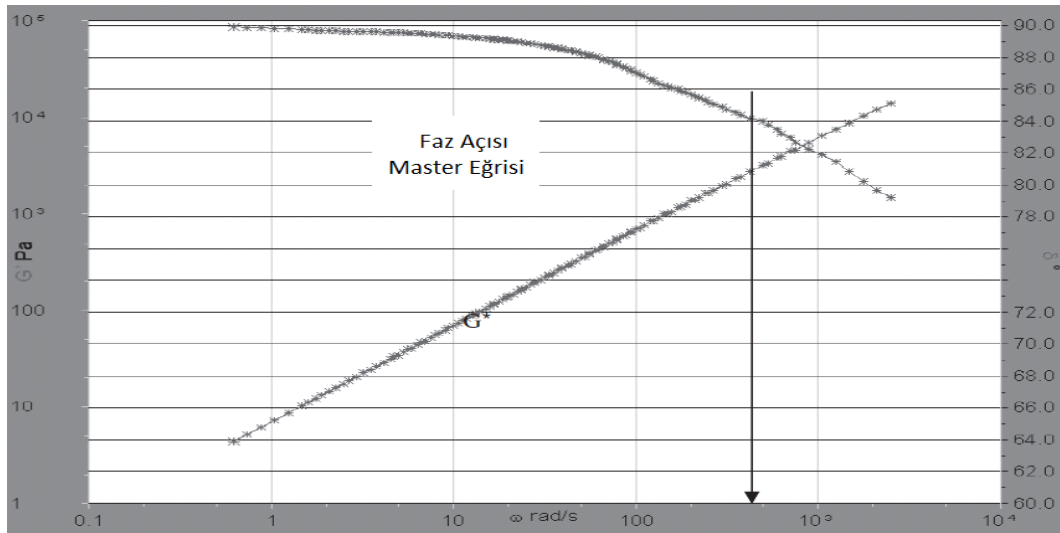
Şekil 5.6. Sabit kesme viskozitesi yönteminde viskozite –sıcaklık ilişkisi [58].

Dinamik kayma reometresinde tespit edilen faz açısının bağlayıcının viskoelastik davranışını dikkate alan uygun bir ölçüm olduğunu belirten John Cosola, modifiye bağlayıcıların karıştırma-sıkıştırma sıcaklıkları için faz açısı yöntemini önermiştir. Bu yöntemde 0,5 mm açıklık ve 25 mm çapa sahip paralel plaklar arasındaki bağlayıcıya 0,001 – 100 rad/s frekans ( $\omega$ ) aralığında ve 50-60-70-80 °C’lerde dinamik kesme deneyi uygulanmaktadır. Deney şekil değiştirme kontrollü yapılmakta ve şekil değiştirme %12’de

tutulmaktadır. Farklı sıcaklıklarda elde edilen veriler faz açılarının kararlılık gösterdiği 80 °C referans sıcaklığına dönüştürülmekte ve yatay ekseninde dinamik kesme frekansı düşük ekseninde faz açısı grafiği çizilmektedir (Şekil 5.7). Faz açısının 90 – 85 arası tam viskoz davranıştan viskoelastik davranışa geçişi temsil ettiği dolayısıyla bu aralığın bağlayıcıların reolojik karakterlerini ayırt etmede uygun olduğu belirtilmiş ve bu yöntemde karıştırma-sıkıştırma sıcaklığını tespit etmek için frekansa karşı çizilen faz açısı grafiğinden 86 ° faz açısına karşılık gelen frekans tespit edilmektedir. Yöntem, karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarını sırasıyla Formül 5.1 ve 5.2 ile tespit etmektedir [58].

$$\text{Karıştırma sıcaklığı (F}^\circ\text{)} = 325w^{-0,0135} \quad (5.1)$$

$$\text{Sıkıştırma sıcaklığı (F}^\circ\text{)} = 300w^{-0,012} \quad (5.2)$$



Şekil 5.7. Faz açısı yönteminde frekans- gerilme, faz açısı ilişkisi [58].

#### 5.1.4 Kiriş Eğme Reometresi (BBR) Deneyi

Bitümlü bağlayıcılar, düşük sıcaklıklarda rijit (katı) özellik 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. [48]. Bu deney için uzun süreli yaşlandırma (PAV) deneyinden elde edilen yaşlandırılmış bağlayıcılar kullanılmaktadır. Deney boyunca asfalt kiriş bağlayıcı sınıfına

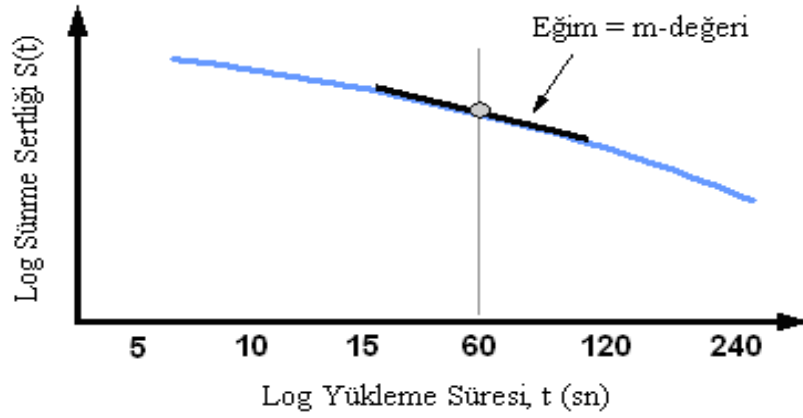
göre sabit düşük sıcaklık değerinde tutulmaktadır. Deney için 6,35x127x12,7 mm. boyutlarındaki numuneler kullanılmaktadır. AASHTO TP1 standardına uygun olarak yapılan kiriş eğme reometresi deneyinde asfalt kirişinin orta noktasından 240 saniye boyunca 980 mN'luk yük etki ettirilmektedir (Şekil 5.8) [55,56].



Şekil 5.8. Kiriş Eğme Reometresi deney aleti (BBR)

Deney sonunda yük ve defleksiyon değerleri, bağlayıcının sünme sertliğini  $S_{(t)}$  ve sünme oranını (m-değeri) tespit etmek amacıyla kullanılmaktadır. Sünme sertliği, numunelerin sabit sünme yüklerine karşı dayanımın bir göstergesiyken sünme oranı (m-değeri) ise 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 5.9). Bu grafikte eğriye teğet olan doğrunun 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 [55,56].





Şekil 5.9. Sünme oranının belirlenmesi [56].

### 5.1.5 Dönel Viskozimetre (RV) Deneyi

Dönel viskozimetre (RV) deneyi, bitümlü bağlayıcıların yüksek sıcaklıktaki akışkanlık karakteristiklerini belirlemek amacıyla uygulanmaktadır. Bu amaçla AASHTO TP48 standardına uygun olarak “Brookfield Viskozimetresi” kullanılmaktadır (Şekil 5.10). Bağlayıcıların yüksek sıcaklık viskozite değerleri, pompalanma ve karıştırma sırasında bağlayıcıların yeterince akışkan olduklarının tespiti amacıyla belirlenmektedir. Deneyde bir motor yardımıyla iğnenin düzenli olarak 20 devir/dakika hızla dönmesi sağlanmakta ve viskozite okumaları yapılmaktadır. Genellikle orijinal bağlayıcılar üzerinde uygulanan RV deneyinde 135 °C’deki viskozite değerinin 3 Pa-s’yi aşmaması istenir [51,59].

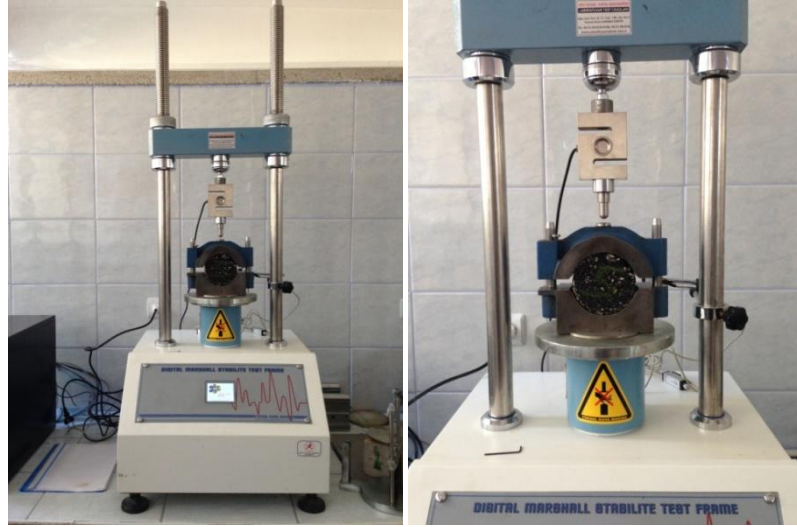


Şekil 5.10. Brookfield Dönel Viskozimetresi

## 5.2 Bitümlü Karışımlar Üzerine Uygulanan Deneyler

### 5.2.1 Marshall Stabilitesi ve Akma Deneyi

Karışım numuneleri üzerinde Marshall stabilite ve akma deneyi TS EN 12697-34, 2007 standardına göre yapılmaktadır. Stabilite; deformasyona karşı maksimum dayanım olarak, akma ise maksimum yüke ulaşıldığı anda numunede meydana gelen düşey deformasyon olarak standartta tanımlanmaktadır. 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. Kırma 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 kırma çenesine ortalanacak biçimde yerleştirilmekte ve numuneye  $50 \pm 2$  mm/dakika hızla yükleme yapılmaktadır. Marshall deney düzeneği Şekil 5.11' de görülmektedir.



Şekil 5.11. Marshall stabilite ve akma aleti

Deneyde, maksimum yük ve maksimum yüke ulaşıldığı anda deformasyon değerleri kaydedilmektedir. Deneyde standart numune yüksekliğinin 63,5 mm olduğu kabul edilmektedir. Farklı yüksekliklere sahip numuneler için stabilite düzeltme katsayıları Formül 5.3 ile tespit edilmektedir.

$$c = 5,24 \times e^{(-0,0258 \times h)} \quad (5.3)$$

Burada  $c$ , düzeltme katsayısı,  $h$  ise mm olarak numune yüksekliğidir. Elde edilen stabilite ve akma değerlerinin ortalaması alınmaktadır.

Marshall stabilitesi değerinin akma değerine bölünmesi ile Marshall oranı (MQ) belirlenmektedir. Marshall oranı, karışımın sertliğinin ve asfalt betonunun deformasyona karşı direncinin bir göstergesidir [60,61].

### 5.2.2 İndirek Çekme Rijitlik Modülü Deneyi

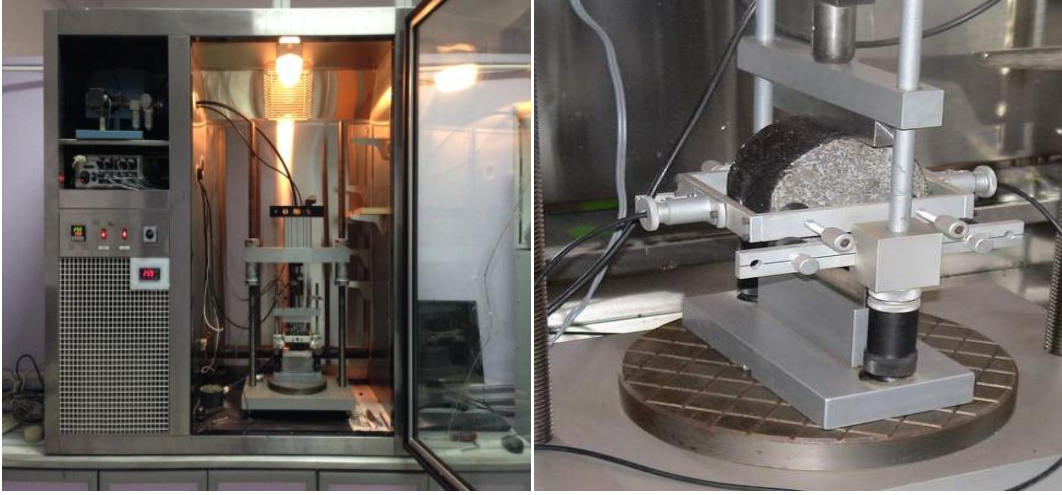
İndirek çekme modunda ölçülen rijitlik modülü, elastik özelliklerin değerlendirilmesinde kullanılan gerilme-şekil değiştirme ölçümlerinin en yaygın şeklidir. Bitümlü tabakaların yük dağıtma kabiliyetinin bir ölçüsü olan rijitlik modülü, bitümlü sıcak karışımların en önemli performans karakteristiklerinden birisidir [61].

BSK'ların rijitlik modülünün deneysel olarak belirlenmesinde, direk basınç, indirek çekme, burulma deneyleri uygulanmaktadır. Bütün deney metotları, viskoelastik bir malzemenin kısa süreli yüklemelerde elastik davrandığı kabulüne dayanmaktadır. 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. Rijitlik modülü esasında viskoelastik malzemenin ani elastik modülüdür. Diametral deneyler, direk basınç deneylerine göre karışımdaki bağlayıcının etkisine karşı daha hassas olduğundan daha yaygın olarak kullanılmaktadır. Direk basınç deneyindeki asfalt karışımlarında agregalar arasındaki kenetlenme ve bağlayıcının rijitliği söz konusu olurken, çekme deneyinde agrega kenetlenmesi daha az öneme sahiptir [62].

Bu deney BS DD 213 standardı ile tanımlanmış hasarsız bir deney olup rijitlik modülü ( $S_m$ , MPa) Formül 5.4 ile hesaplanmaktadır.

$$S_m = F(R + 0,27) / LH \quad (5.4)$$

Burada  $F$ , maksimum dikey yük (N);  $H$ , 5 yük tekrarı sonucunda oluşan ortalama yatay deformasyon (mm);  $L$ , ortalama numune kalınlığı (mm);  $R$  ise poisson oranıdır (0,35). Çalışmada Şekil 5.12' deki UMATTA (Universal Material Testing Apparatus) deney aleti kullanılmıştır.



Şekil 5.12. UMATTA deney aleti ve indirek çekme rijitlik modülü deney düzeneği

### 5.2.3 İndirek Çekme Yorulma Deneyi

Bitümlü kaplamalar, her bir taşıt geçişinde kısa süreli bir yüke maruz kalmaktadır. Bu yükler, kaplamanın rijitliğinin azalmasına neden olan küçük hasarlara yol açmaktadır. Bu küçük hasarlar uzun dönemde yorulma çatlakları olarak adlandırılan kaplama bozulmalarına neden olmaktadır [63]. Yorulma çatlakları, bitümlü sıcak karışımlarda en fazla görülen ve trafik yüklerinden ve tekerrüründen kaynaklanan bozulma türüdür. Yorulma çatlakları, tekrar eden yükler sonucu çatlak oluşumunun ardından giderek artmaktadır [37]. Pratikte yorulmadan kaynaklanan bozulma belirli bir oranda kaplamanın yorulma çatlakları ile kaplanması şeklinde tanımlanmaktadır.

Laboratuvar ortamında bitümlü sıcak karışımların yorulma dayanımlarını tespit edebilmek amacıyla 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 gösterdiğinden yapılan bu deneylerde yorulma ömürleri 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 gözlemlenmiştir. Bu durum, yorulma ömrünün gerilme dağılımının ve kaplamanın sınır şartlarının bir fonksiyonu olmasından kaynaklanmaktadır [64]. Buna rağmen yorulma deneyleri, farklı karışımların yorulma performanslarını karşılaştırmak için imkan sağlamaktadır.

Üst yapı performansında en önemli özellik olarak BSK' ların yorulma davranışı kabul edilmektedir. BSK'ların sıkışması, asfalt içeriği ve hava boşluğu gibi özelliklerin etkinlik dereceleri diğer deneylere göre, yorulma davranışının incelenmesi ile daha açık bir şekilde belirlenebilmektedir. Kaliforniya Ulaştırma Bölümünde yapılan bir çalışmada, %5 asfalt % 5 hava boşluğunda imal edilmiş bitümlü sıcak karışımlarda hava boşluğunun %1 artması yorulma ömrünü %30, asfalt içeriğinin ise hedeflenen değerden %1 az olmasının yorulma ömrünü %12 azalttığı belirtilmiştir [65].

İndirek 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, numunenin düşey doğrultuda numunenin orta kısmında yarıma meydana gelmesine neden olmaktadır.

Gerilme kontrollü indirek çekme yorulma deneyi (İÇYD), UMATTA deney aleti kullanılarak yapılmaktadır. Şekil 5.13' de deney düzeneği görülmektedir. 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 sensörler (LVDT) ayarlanmakta ve deneye başlanmaktadır. Deney, ya numuneler tam olarak kırılıncaya kadar ya da rijitlikleri yarılanıncaya kadar devam etmektedir.



Şekil 5.13. İndirek çekme tekrarlı yorulma deney düzeneği

#### 5.2.4 Dinamik Sünme Deneyi

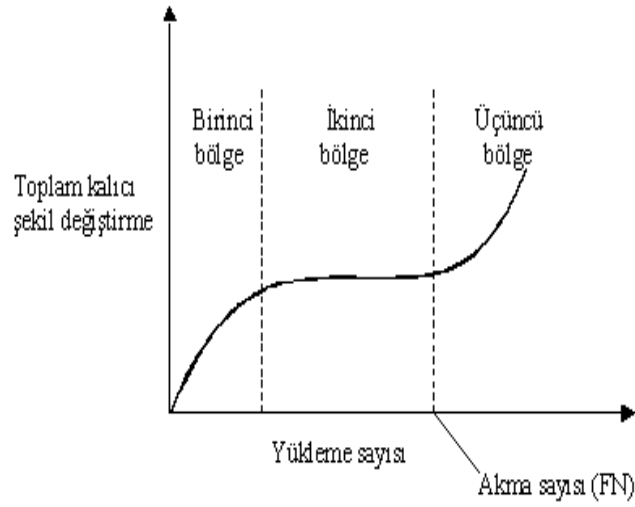
Bu deneyde sabit bir değerdeki yük, silindirik numunenin yatay yüzüne belirli periyot ile tekrarlı olarak uygulanmaktadır. Dinamik sünme deneyinde yük tekrar sayısının bir fonksiyonu olarak ölçülen toplam kalıcı deformasyon, tekerlek izi potansiyeli ile ilişkilendirilebilmektedir. Deney, farklı sıcaklık ve yüklemelerde yapılabilmektedir. Bu deney ile ayrıca belli bir poisson oranı kabul ederek ve yatay deformasyonun ölçülmesi ile rezilans modülü de tespit edilebilmektedir. Dinamik sünme deneyinde genellikle yük tekrar sayısı ve toplam kalıcı şekil değiştirme eğrisi (Şekil 5.14) sonuç olarak verilmektedir. Burada akma sayısı üçüncü bölgenin başladığı yük tekrar sayısı olarak tekerlek izi potansiyeli ile ilişkilendirilmektedir. Yapılan çalışmada beş deney arasından dinamik sünme deneyinin arazide ölçülen tekerlek izi derinliği ile çok iyi korelasyon verdiği belirtilmiştir [66]. Şekil 5.15’ te yük zaman ve yük deformasyon arasındaki ilişki görülmektedir.

Dinamik sünme deneyinde toplam eksenel birim şekil değiştirme ( $\mu\epsilon$ ) ve sünme rijitliği  $E_c$  Formül 5.5 ve 5.6 ile hesaplanmaktadır.

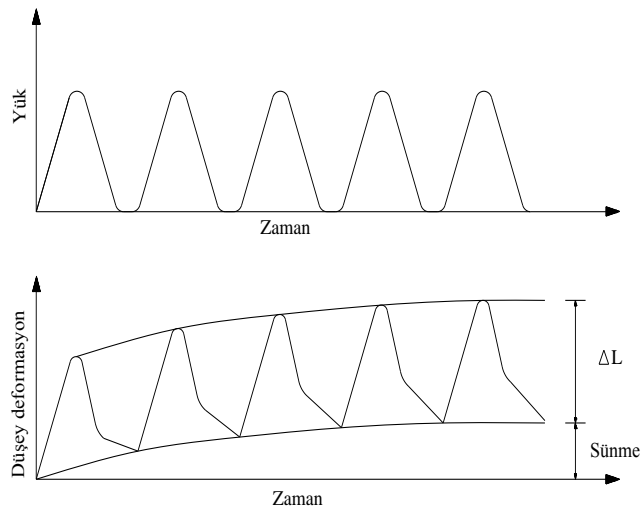
$$\varepsilon_c = (L3_n - L1) / G \quad (5.5)$$

$$E_c = \sigma / \varepsilon_c \quad (5.6)$$

Burada  $L3_n$ , n darbe sayısındaki deplasman (mm),  $L1$ , başlangıç referans deplasmanı (mm),  $G$ , numunenin başlangıç yüksekliği (mm),  $\sigma$ , maksimum düşey gerilmedir (kPa). Çalışmada Şekil 5.16'daki test düzeneğine sahip UTM cihazı kullanılmıştır.



Şekil 5.14. Yük tekrar sayısı-Şekil değiştirme ilişkisi



Şekil 5.15. Yük-zaman ve deformasyon-zaman ilişkisi



**Şekil 5.16.** Dinamik sünme deney düzeneği



## **6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR**

Bu çalışmada SBS ve Sasobit katkı maddelerinin bitüm ve bitümlü sıcak karışımlarda kullanımı geniş ölçekli olarak değerlendirilmiştir. Değerlendirmede SBS modifiyeli bitüm ve karışımlar, katkı içermeyen kontrol numunelerinin yanı sıra bir ılık karışım katkısı olan ve kullanımı giderek yaygınlaşan Sasobit modifiyeli bitüm ve karışımlar ile karşılaştırılmıştır. Çalışmada katkıların hem ayrı olarak hem de aynı karışım içinde birlikte kullanılmalarının etkileri incelenmiştir. Bu amaçla ilk önce çalışmada kullanılacak malzemelerin karakteristikleri ve şartnamelere uygunluğu tespit edilmiştir. Çalışma temel olarak iki bölümden oluşmaktadır birinci bölümde değişik oranlarda SBS ve Sasobit içeren bitümler üzerinde yumuşama noktası, penetrasyon, dinamik kesme reometresi, dönel viskozimetre ve kırılganlık deneyleri uygulanmıştır. İkinci bölümde ise SBS ve Sasobit modifiyeli bağlayıcılar ile hazırlanmış bitümlü sıcak karışım numuneleri ve modifiyesiz bağlayıcı ile hazırlanmış kontrol numuneleri üzerinde Marshall stabilite ve akma, indirek çekme rijitlik modülü, indirek çekme tekrarlı yorulma, dinamik sünme deneyleri uygulanmıştır.

### **6.1. Malzeme Karakteristiklerinin Belirlenmesi**

Çalışmada bağlayıcı olarak TÜPRAŞ rafinerisinden temin edilen B 50/70 sınıfı asfalt çimentosu kullanılmıştır. Bağlayıcıya ait özellikler Tablo 6.1'de verilmiştir. Bitüm modifikasyonunda kullanılan SBS (Kraton D1101) Shell bitüm şirketinden, Sasobit ise Sasolwax firmasından temin edilmiştir. Çalışmanın bağlayıcı deneyleri ile alakalı birinci bölümünde saf bağlayıcı da olmak üzere Tablo 6.2'de verilen toplam 16 farklı bağlayıcı değerlendirilmiştir.

**Tablo 6.1.** Bağlayıcının Özellikleri

Özellikler	Standard	B 50/70
Penetrasyon (0,1 mm), 100 g, 5 s	ASTM D5	51.25
Yumuşama noktası (°C)	ASTM D36	52.2
Penetrasyon indeksi (PI)		-0.61
Özgül ağırlık		1.024
Viskozite (cP, 135°C)	ASTM D4402	600
Viskozite (cP, 165°C)	ASTM D4402	175
Karıştırma sıcaklığı (°C)		165.8
Sıkıştırma sıcaklığı (°C)		152.8

**Tablo 6.2.** Bağlayıcı kombinasyonları

	Bağlayıcı ağırlığınca kullanılan katkı oranı (%)															
	SBS	0	0	0	0	2	2	2	2	3	3	3	3	4	4	4
Sasobit	0	2	3	4	0	2	3	4	0	2	3	4	0	2	3	4
Gösterimi	0-0	0-2	0-3	0-4	2-0	2-2	2-3	2-4	3-0	3-2	3-3	3-4	4-0	4-2	4-3	4-4

Çalışmanın ikinci bölümünde bitümlü sıcak karışımlar ile ilgili deneylerde kullanılacak numuneler taş-mastik-asfalt karışım numuneleri olarak imal edilmiştir. Böylece yüksek sıcaklıklarda kalıcı deformasyonlara karşı direnci ve düşük ısı ısılarında çatlamalara karşı direnci yüksek olan ve son zamanlarda kullanımı yaygınlaşan bu karışım tipi çok farklı modifiye bağlayıcılarla değerlendirilmiş olacaktır. Taş-mastik-asfalt karışım numunelerinin üretiminde agrega olarak Elazığ Karayazı bölgesinden temin edilen kırmataş kalker kullanılmıştır. Agregaya ait fiziksel özellikler ve karışımlarda kullanılan agrega gradasyonu sırasıyla Tablo 6.3 ve Tablo 6.4' te verilmiştir.

**Tablo 6.3.** Agreganın Fiziksel Özellikleri

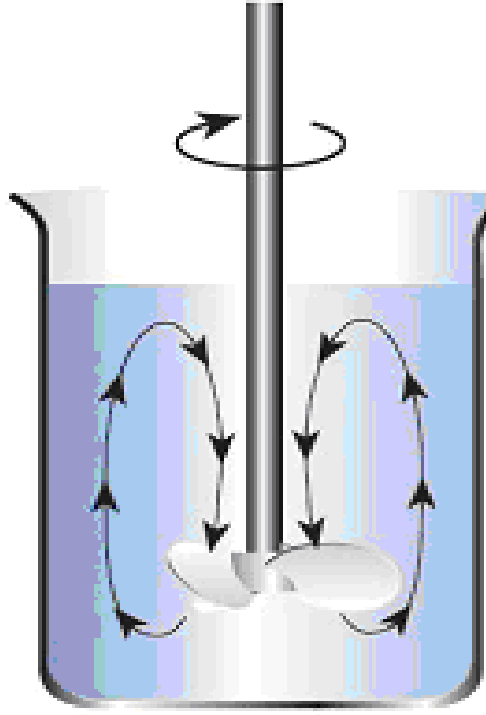
Özellikler	Standart	Limitler	Kaba	İnce	Filler
Aşınma kaybı (%) (Los Angeles)	ASTM C 131	Max 30	29	-	-
Don etkisi (%) (Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ile)	ASTM C 88	Max 10	4.5	-	-
Yassı ve uzun daneler (%)	ASTM D 4791	Max 10	4		
Su emme (%)	ASTM C127	Max 2	1.37		
Özgül ağırlık (g/cm <sup>3</sup> )	ASTM C127		2.613	-	-
Özgül ağırlık (g/cm <sup>3</sup> )	ASTM C128		-	2.622	-
Özgül ağırlık (g/cm <sup>3</sup> )	ASTM D854		-	-	2.711

**Tablo 6.4.** Agrega Gradasyonu

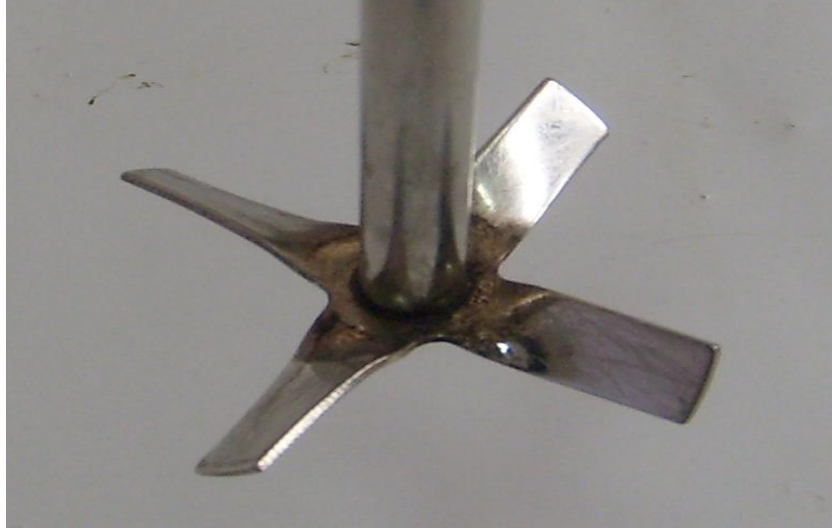
Elek çapı (mm)	19	12.5	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
Geçen (%)	100	95	88	65	35	23	15	11	8	6

## 6.2. Modifiye Bağlayıcıların Hazırlanması

Modifiye bağlayıcının laboratuvarında üretimi için firmalar tarafından geliştirilen değişik karıştırma milleri bulunmaktadır. Bu çalışmada kap içinde Şekil 6.1' deki etkiyi yapan Şekil 6.2'deki karıştırma mili kullanılmıştır. SBS ve sasobit katkılı modifiye bitümler, saf bitüm akışkan hale gelip karıştırma kabına aktarıldıktan sonra katkının belirlenen içerikte yavaş yavaş ilave edilip, 1000 devir/dakika hıza sahip karıştırıcıda (Şekil 6.3) 175 °C sabit sıcaklıkta 1 saat süre ile karıştırılarak hazırlanmıştır. Hazırlanan modifiye bitümler küçük kaplara boşaltılmış, kaplar alüminyum folyo ile kaplanmış ve deneylerde kullanılmak üzere saklanmıştır.



Şekil 6.1. Karıştırma milleri ve etkileri



Şekil 6.2. Çalışmada kullanılan karıştırma mili

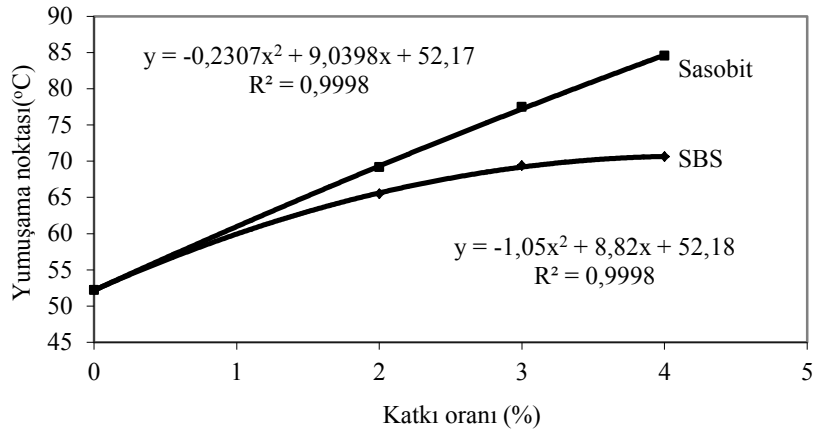


Şekil 6.3. Modifiye bitüm karıştırma cihazı

### 6.3. Bağlayıcılar Üzerinde Uygulanan Deney Sonuçları

#### 6.3.1. Yumuşama Noktası Deney Sonuçları

Modifiye bağlayıcılar B 50/70 gibi sert bir bitüm kullanılarak üretildiklerinden yumuşama noktaları gliserin içerisinde tespit edilmiştir. Katkıların ayrı ayrı kullanılması durumunda yumuşama noktalarında meydana gelen değişim Şekil 6.4' de verilmiştir. Sasobit ilavesi ile birlikte yumuşama noktası doğrusal bir şekilde artarken SBS ilavesinin yumuşama noktasının artması üzerindeki etkisi yüksek katkı oranında azalmaktadır. %4 Sasobit modifiyeli bağlayıcının yumuşama noktası %4 SBS modifiyeli bağlayıcınıninkinden %16,5 daha fazladır. %4 Sasobit ve SBS modifikasyonu ile saf bağlayıcının yumuşama noktası sırası ile %38 ve %26 daha fazla çıkmıştır.



Şekil 6.4. Katkı oranı yumuşama noktası ilişkisi

SBS modifikasyonu içinde Sasobitin etkisinin yada Sasobit modifikasyonu içinde SBS etkisinin araştırılması amacıyla yumuşama noktaları matris formunda Şekil 6.5 ve 6.6' da verilmiştir..

		SBS oranı (%)			
		2	3	4	
Sasobit oranı (%)	0	65,50	69,35	70,60	→
	2	73,75	74,30	75,65	→
	3	78,05	80,20	82,40	→
	4	85,75	87,45	88,20	→
			↓	↓	↓

Şekil 6.5. SBS modifikasyonu içinde FT-parafin etkisi

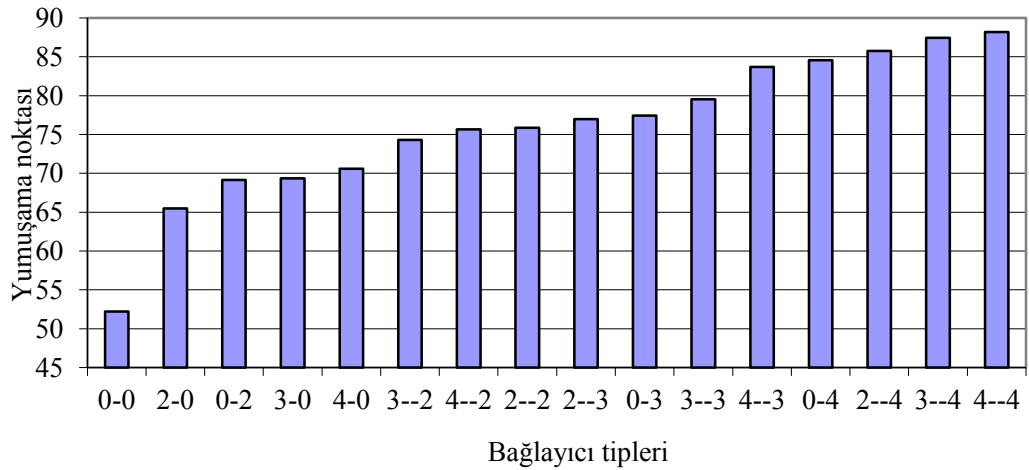
SBS modifikasyonu içinde Sasobit etkisi inceleme imkanı sunan Şekil 6.5'teki matriste yukardan aşağı doğru SBS oranı sabit kalırken Sasobit oranı artmakta, soldan sağa doğru ise Sasobit oranı sabit kalırken SBS oranı artmaktadır. Matriste yukardan aşağı doğru olan yumuşama noktalarındaki artışın, soldan sağa doğru olan artışlardan daha fazla olduğu dolayısıyla SBS modifikasyonu içinde Sasobitin çok etkili olduğu görülmektedir. Aynı durum Şekil 6.6'daki matriste de görülmektedir. Burada soldan sağa SBS oranı sabit kalarak Sasobit oranı artmakta ve bu doğrultudaki artışların yukardan aşağı doğru olan artışlardan daha fazla olduğu görülmektedir. %4 Sasobit modifikasyonu içinde SBS'in kullanılmaması ile %4 oranında kullanılması arasında yumuşama noktasını sadece 3,65 °C

artarken, %4 SBS modifikasyonu içinde Sasobitin kullanılmaması ile %4 oranında kullanılması arasında yumuşama noktası 17,6 °C artmaktadır.

		Sasobit oranı (%)			
		2	3	4	
SBS oranı (%)	0	69,15	77,45	84,55	→
	2	73,75	78,05	85,75	→
	3	74,30	80,20	87,45	→
	4	75,50	82,40	88,20	→
		↓	↓	↓	

Şekil 6.6. Sasobit modifikasyonu içinde SBS etkisi

Şekil 6.7’de bütün bağlayıcıların yumuşama noktaları küçükten büyüğe doğru sıralanmıştır. En yüksek dört yumuşama noktası %4 Sasobit içeren SBS modifikasyonu ile elde edilmiştir. Sadece %4 Sasobit modifikasyonu %4SBS+%3 Sasobit modifikasyonundan bile daha yüksek yumuşama noktası vermiştir. Saf bağlayıcı dışında ele alınan 15 farklı kombinasyondan 11’inin yumuşama noktası %4 SBS modifiyeli bağlayıcınıninkinden daha yüksek çıkmıştır.



Şekil 6.7. Bağlayıcı tiplerinin yumuşama noktalarındaki değişim

### 6.3.2 Penetrasyon Deney Sonuçları

Tablo 6.5' te penetrasyon deneyindeki her bir deneme ve ortalama sonuçlar ve ısıya karşı hassasiyetin göstergesi olan penetrasyon indeksi (PI) sonuçları verilmiştir.

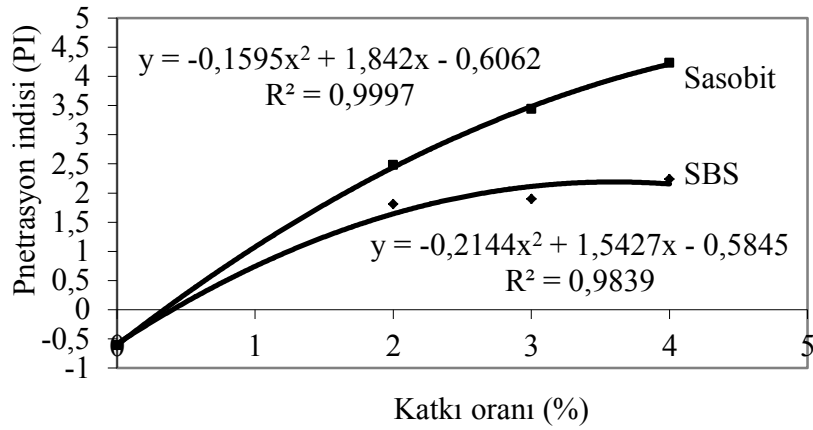
**Tablo 6.5.** Penetrasyon deney sonuçları

Bağlayıcı tipleri	1.deneme	2.deneme	3.deneme	4.deneme	5.deneme	Ortalama	PI
0-0	52	53	50	50	51	<b>51.25</b>	<b>-0.61</b>
0-2	45	44	48	47	46	<b>46</b>	<b>2.47</b>
0-3	44	40	40	39	41	<b>40.75</b>	<b>3.44</b>
0-4	35	40	40	38	38	<b>38.25</b>	<b>4.23</b>
2-0	44	45	47	45	45	<b>45.25</b>	<b>1.81</b>
2-2	30	30	33	29	31	<b>30.5</b>	<b>2.22</b>
2-3	35	35	35	35	35	<b>35</b>	<b>3.15</b>
2-4	30	31	32	30	31	<b>30.75</b>	<b>3.86</b>
3-0	35	36	36	36	36	<b>35.75</b>	<b>1.89</b>
3-2	34	30	29	29	31	<b>30.5</b>	<b>2.30</b>
3-3	35	32	30	30	32	<b>31.75</b>	<b>3.22</b>
3-4	28	28	31	27	29	<b>28.5</b>	<b>3.89</b>
4-0	35	40	39	38	38	<b>38</b>	<b>2.24</b>
4-2	30	28	32	27	29	<b>29.25</b>	<b>2.40</b>
4-3	35	33	34	35	34	<b>34.25</b>	<b>3.69</b>
4-4	30	30	27	26	28	<b>28.25</b>	<b>3.96</b>

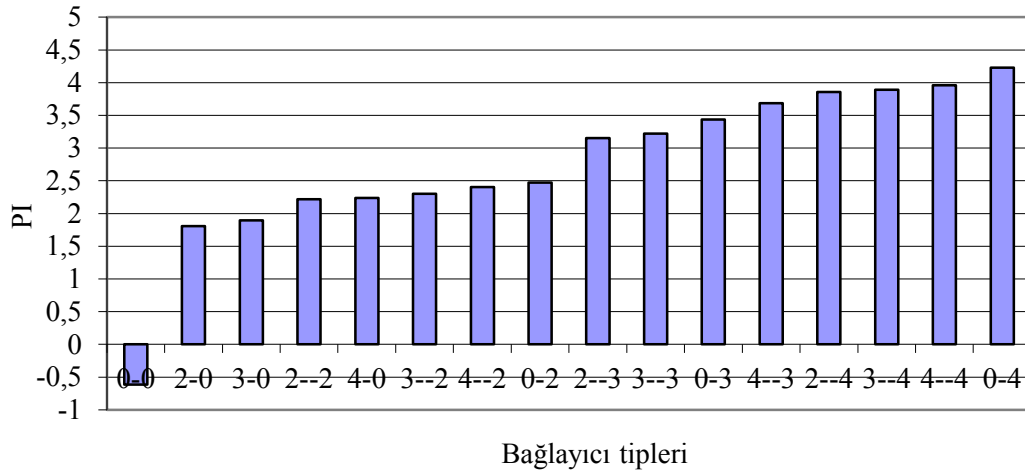
Şekil 6.8'de katkıların ayrı olarak kullanılması durumunda bağlayıcıların penetrasyon indislerinde meydana gelen değişim verilmiştir. Katkı oranlarının artması ile bağlayıcıların ısıya karşı hassasiyetleri azalmaktadır. Bu azalış Sasobit modifikasyonunda daha belirgin olmaktadır. SBS içeriğinin %2 den %4 çıkması durumunda PI değeri %24 artarken, Sasobit modifikasyonunda bu artış %71 olmaktadır. Ayrıca SBS modifikasyonunda %4 katkı oranından sonra PI değerlerinde daha fazla artış eğilimi görülmezken, Sasobit modifikasyonunda %4 katkı oranından sonra da PI değerlerinin artış eğilimi içinde olduğu görülmektedir.

Şekil 6.9'da bütün bağlayıcıların PI değerleri küçükten büyüğü doğru sıralı olarak verilmiştir. Burada da yumuşama noktası değerlerinde olduğu gibi saf bağlayıcı hariç en düşük 4 değer içinde sadece SBS modifiyeli bağlayıcılar, en yüksek 4 değer içinde ise %4 Sasobit içeren SBS modifiyeli bağlayıcılar yer almıştır.





Şekil 6.8. Katkı oranı PI ilişkisi

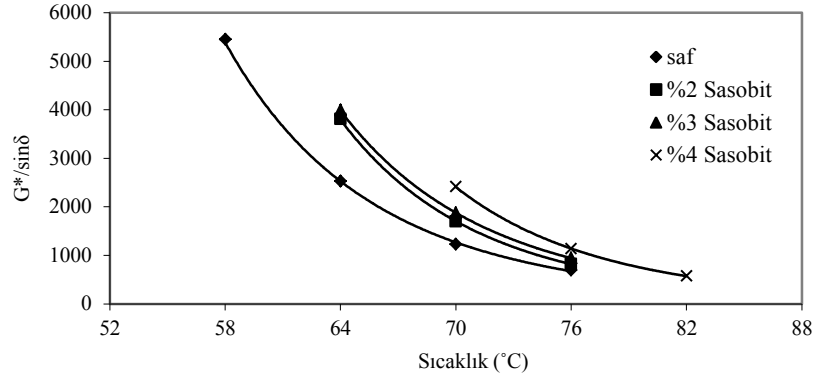


Şekil 6.9. Bağlayıcıların PI değerlerindeki değişim

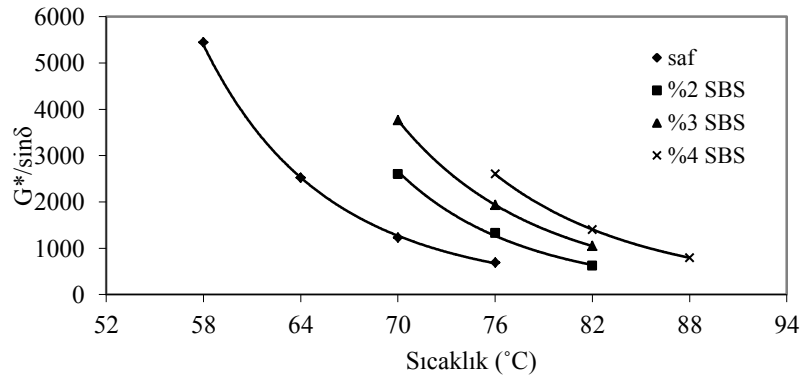
### 6.3.3 Dinamik Kesme Reometresi (DSR) Deney Sonuçları

Çalışmada saf ve modifiye bitümlerin 1,59 Hz (10 rad/sn) frekansta ve her bağlayıcı için 6 derece artımlarla en az 3 farklı sıcaklıkta kompleks modülleri ve faz açıları tespit edilmiştir. Şekil 6.10 ve 6.11’de katkıların ayrı ayrı kullanılmaları durumunda farklı sıcaklıklardaki  $G^*/\sin\delta$  değerlerine etkileri verilmiştir. Sıcaklık arttıkça her iki katkılı bağlayıcıda da  $G^*/\sin\delta$  değerleri azalmakta bu azalış orta sıcaklıklarda daha fazla olmaktadır. Her 6 derecelik sıcaklık artışında bağlayıcıların tekerlek izi parametreleri yaklaşık olarak yarı yarıya azalmaktadır. Saf bağlayıcı minimum 1,0 kPa gereksinimini 70 °C’de sağlarken %4 Sasobit modifiyeli bağlayıcı 76 °C’de sağlamaktadır. %4 SBS modifiyeli bağlayıcı 82 °C’de 1,0 kPa gereksinimini fazlasıyla sağlamıştır. Şekil 6.12’de

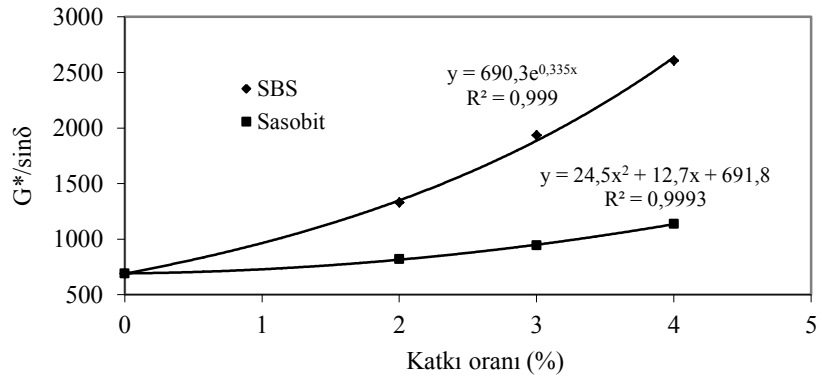
76 °C’de katkıların ayrı olarak kullanılması durumunda katkı içeriğinin  $G^*/\sin\delta$  üzerindeki etkisi verilmiştir.



Şekil 6.10. Sasobit modifiyeli bağlayıcıların  $G^*/\sin\delta$  değerlerinin sıcaklıkla değişimi



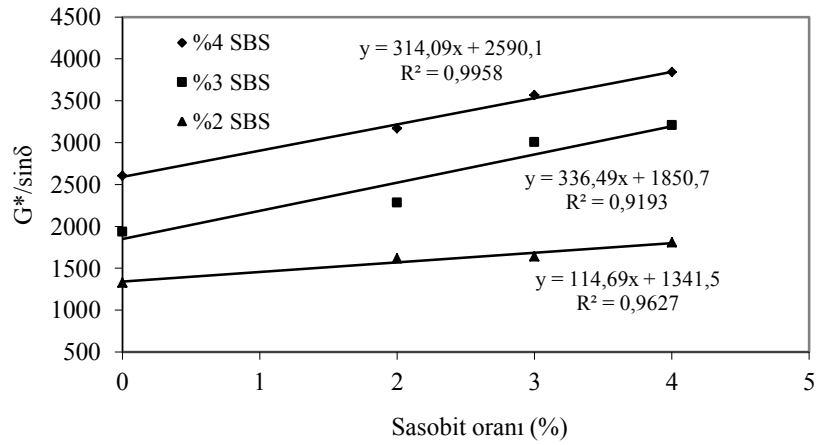
Şekil 6.11. SBS modifiyeli bağlayıcıların  $G^*/\sin\delta$  değerlerinin sıcaklıkla değişimi



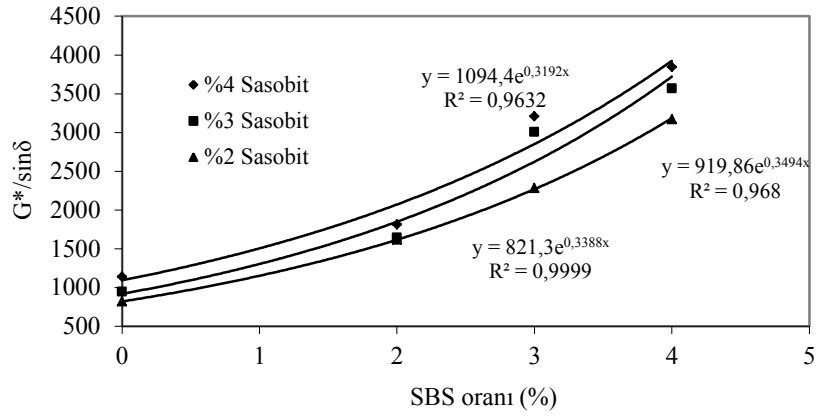
Şekil 6.12. 76 °C’de katkı içeriğinin  $G^*/\sin\delta$  üzerindeki etkisi

Katkı içeriğinin artması ile SBS modifikasyonunda  $G^*/\sin\delta$  değerlerinin üstel bir şekilde, Sasobit modifikasyonunda ise polinomal bir şekilde arttığı tespit edilmiştir. 76 °C’ de %4 Sasobit modifiyeli bağlayıcının tekerlek izi parametresi saf bağlayıcınınkinden %64 daha fazladır. %4 SBS modifikasyonu saf bağlayıcıya göre 76 °C’ de 3,77 kat daha yüksek tekerlek izi parametresi vermektedir. SBS modifikasyonu özellikle yüksek oranlarda Sasobit modifikasyonuna göre  $G^*/\sin\delta$  üzerinde çok daha etkili olmaktadır. 76 °C’ de %4 Sasobit modifikasyonunun performansı yaklaşık %1 SBS modifikasyonu ile elde edilebilmektedir.

Şekil 6.13’te SBS modifikasyonu ile birlikte Sasobit kullanımının, Şekil 6.14’de ise Sasobit modifikasyonu ile SBS kullanımının  $G^*/\sin\delta$  üzerindeki etkileri verilmiştir. Aynı olarak kullanılmalari durumunda  $G^*/\sin\delta$  değerlerinde katkı içeriği ile birlikte üstel ve polinomal olarak meydana gelen artış, SBS modifikasyonunda Sasobit kullanılması durumunda doğrusal, Sasobit modifikasyonunda SBS kullanılması durumunda ise yine üstel olmaktadır.

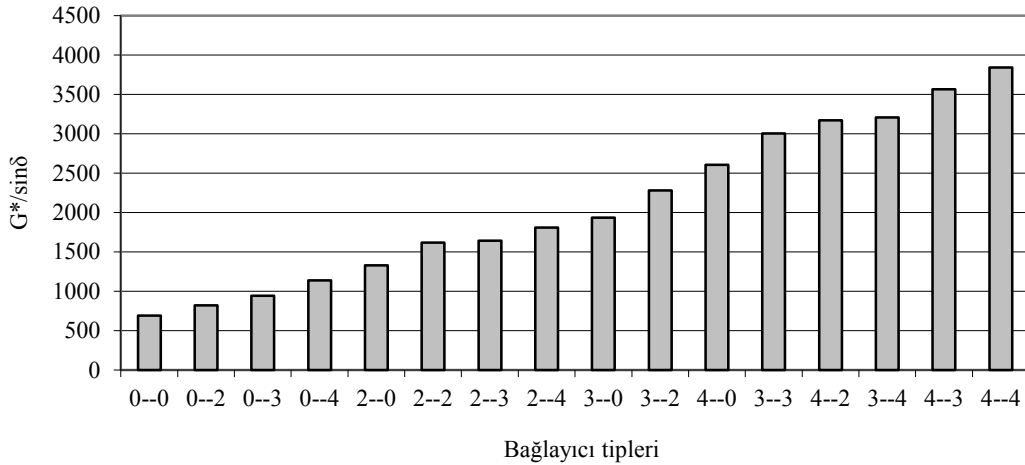


Şekil 6.13. SBS modifikasyonu içinde Sasobitin etkisi



Şekil 6.14. Sasobit modifikasyonu içinde SBS etkisi

Şekil 6.15'te bütün bağlayıcıların 76 °C'deki G\*/sinδ değerleri küçükten büyüğe doğru sıralı olarak verilmiştir. Sadece Sasobit modifiyeli bağlayıcılar en düşük değerlere sahip olurken en yüksek değerleri katkıların birlikte kullanıldığı bağlayıcılar vermiştir. %4 SBS modifikasyonunun sağladığı performanstan daha iyisi %3 SBS+%3 Sasobit ile elde edilebilmektedir. Bu bağlayıcı saf bağlayıcıdan 4,35 kat; %4SBS+%4 Sasobit bağlayıcısı ise saf bağlayıcıdan 5,56 kat daha yüksek G\*/sinδ değeri vermektedir.



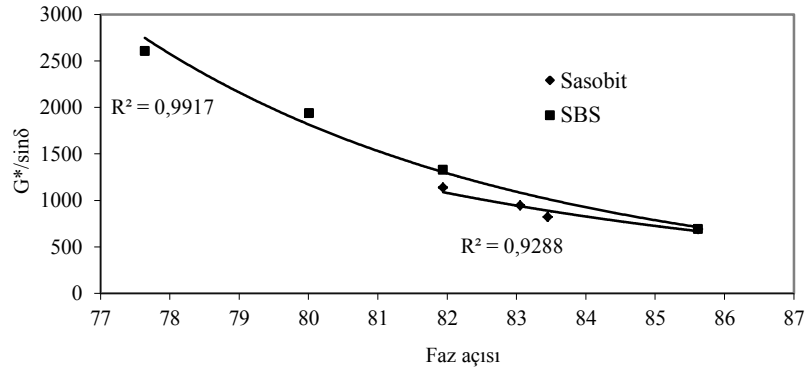
Şekil 6.15. 76 °C'de bağlayıcı tipine göre G\*/sinδ'da meydana gelen değişim

Tablo 6.6'da bağlayıcıların 1,0 kPa gereksinimini sağladığı sıcaklıklar bir arada verilmiştir. %4 SBS ile birlikte %3 yada %4 Sasobit kullanımı bağlayıcının yüksek sıcaklığa karşı direncini önemli derece artırmaktadır.

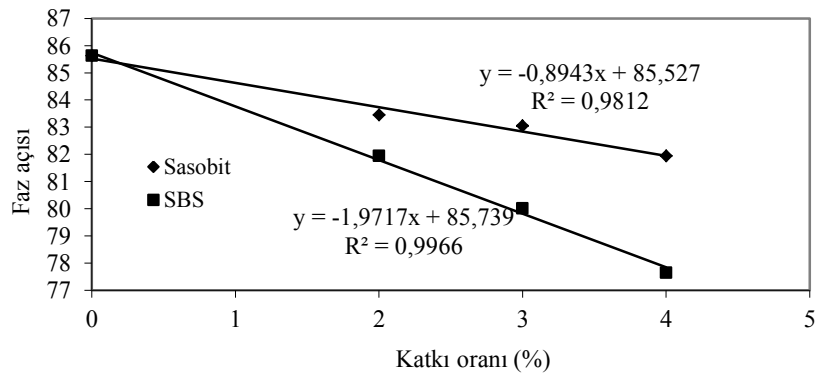
**Tablo 6.6.** Bağlayıcıların 1,0 kPa değerini sağladığı sıcaklıklar

	0-0	0-2	0-3	0-4	2-0	2-2	2-3	2-4	3-0	3-2	3-3	3-4	4-0	4-2	4-3	4-4
°C	70	70	70	76	76	76	76	76	82	82	82	82	82	82	88	88

Bağlayıcıların tekerlek izi parametresinin büyük olması ya kompleks modülünün büyük olması ya faz açısının küçük olması ya da her ikisinin birlikte olması durumunda oluşmaktadır. Şekil 6.16'da 76 °C'de  $G^*/\sin\delta$  değerlerine karşılık faz açısı değerleri verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere aynı  $G^*/\sin\delta$  değerinde Sasobit modifikasyonu daha düşük faz açısı sunmaktadır. SBS modifikasyonu yüksek tekerlek izi parametresi verirken Sasobit modifikasyonu da yüksek sıcaklıkta düşük kompleks modülüne karşılık düşük faz açısı vermektedir. Bu bakımdan katkıların birlikte kullanımı tekerlek izi parametresi açısından çok etkili olmaktadır. Şekil 6.17'da katkıların ayrı olarak kullanılmaları durumunda 76 °C'deki faz açısı üzerindeki etkileri verilmiştir.

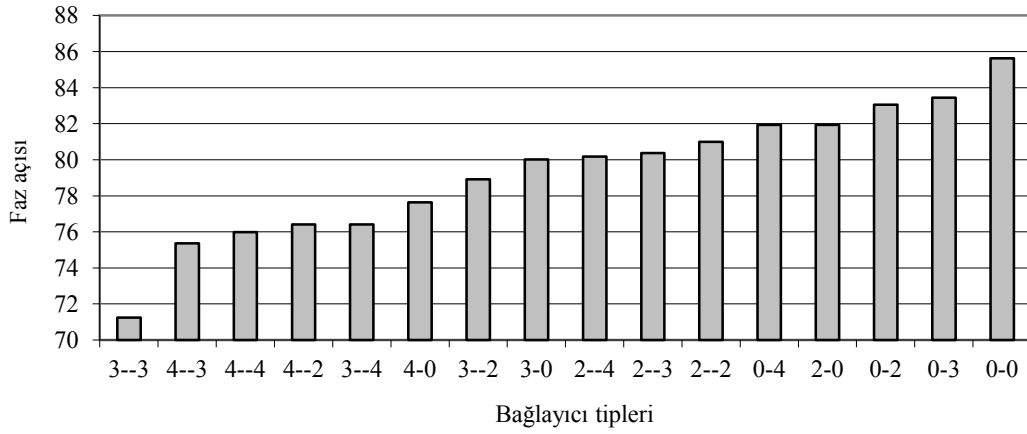


**Şekil 6.16.** 76 °C'de  $G^*/\sin\delta$  değerine karşılık faz açısı değişimi



**Şekil 6.17.** Katkı içeriği ile faz açısı değişimi

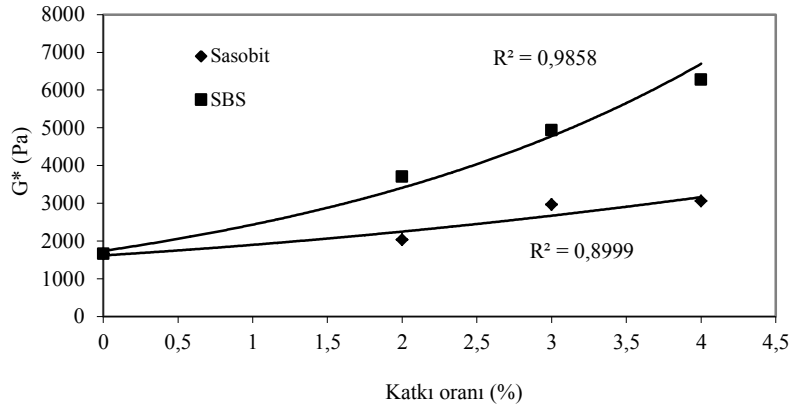
Şekilden görüldüğü üzere katkı içeriğinin artması ile faz açıları azalmaktadır. Bu azalış SBS modifikasyonunda daha fazla olmaktadır. SBS modifikasyonu bir taraftan yüksek kompleks modülü verirken diğer taraftan elastik bileşenin daha fazla olduğuna işaret eden düşük faz açıları vermektedir. Bu da aynı orandaki SBS modifikasyonunun Sasobit modifikasyonuna göre daha esnek davranış sergileyerek daha uzun yorulma direnci ve daha üstün termal direnç göstereceğine işaret etmektedir. SBS modifikasyonu ile aynı faz açısını sağlaması için Sasobit oranının SBS'den 2 kat daha fazla kullanılması gerekmektedir. Şekil 6.18'de bütün bağlayıcıların 76 °C'deki faz açısı değerleri küçükten büyüğe doğru sıralı olarak verilmiştir.



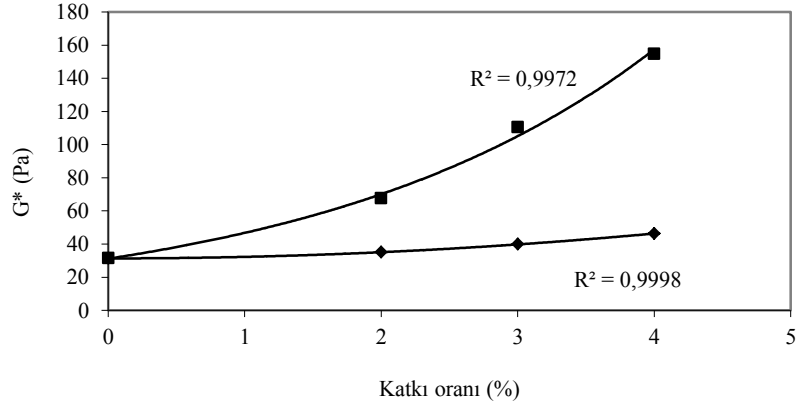
Şekil 6.18. 76 °C'de bağlayıcı tipine göre faz açılarında meydana gelen değişim

Ayrı kullanım durumunda SBS modifikasyonu Sasobit modifikasyonuna göre daha düşük faz açısı değerleri verirken katkıların birlikte kullanımları faz açılarını azaltarak esnekliği artırmaktadır. Özellikle %3SBS+%3 Sasobit modifikasyonu çok düşük faz açısı vererek esnek davranış sergilemektedir.

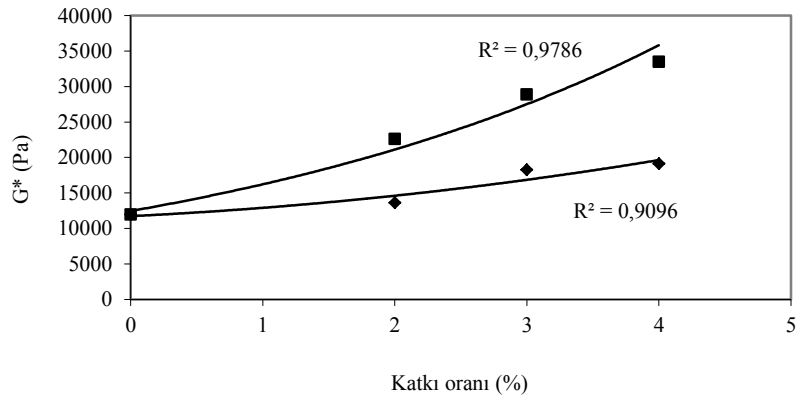
Superpave sisteminde DSR deneyi, uygulama bölgesi sıcaklığına bağlı olarak belirlenen bir sıcaklıkta 1,59 devir/saniye'lik frekansta uygulanmasına rağmen katkılı bağlayıcıların reolojik davranışı üzerindeki etkisinin daha geniş bir aralıkta incelenmesi amacıyla çalışmada iki farklı frekansta (0,1-1) yükleme yapılmış ve dört farklı sıcaklıkta (50-80°C) deneyler uygulanmıştır. Katkıların ayrı olarak kullanılması durumunda katkı oranının değişimi ile bağlayıcıların düşük ve yüksek frekans ve sıcaklıktaki kompleks modülünde meydana gelen değişim Şekil 6.19-6.22'de verilmiştir.



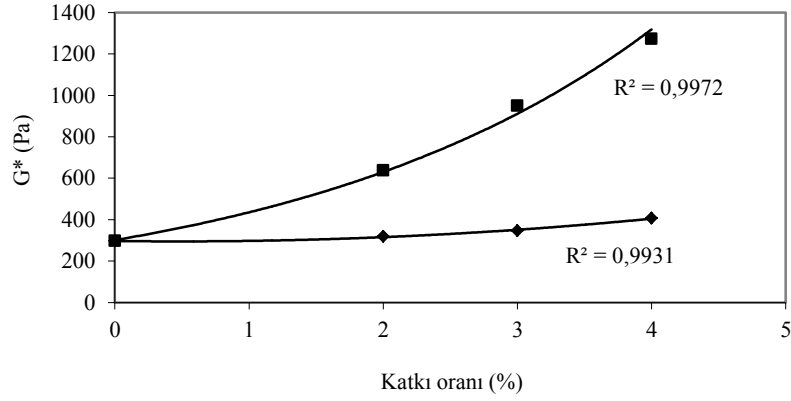
Şekil 6.19. 0.1 Hz 50 °C’de katkı oranı-G\* ilişkisi



Şekil 6.20. 0.1 Hz 80 °C katkı oranı-G\* ilişkisi

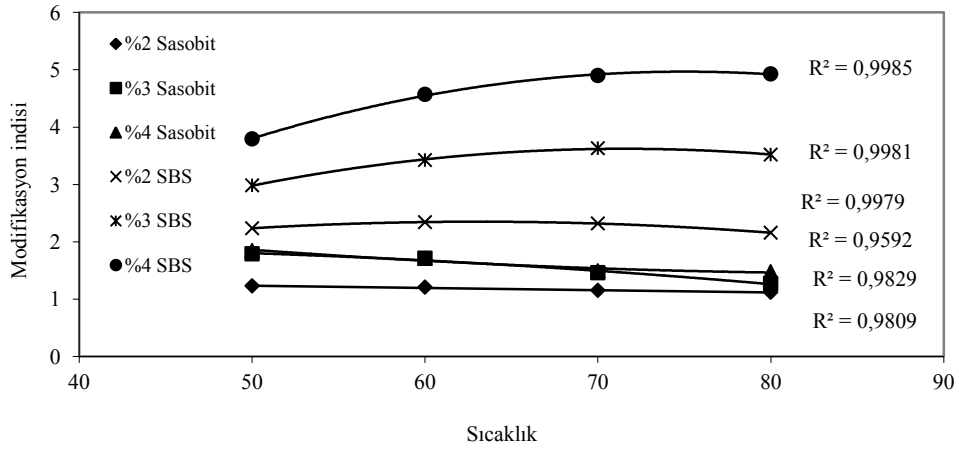


Şekil 6.21. 1 Hz 50 °C katkı oranı-G\* ilişkisi



Şekil 6.22. 1 Hz 80 °C katkı oranı-G\* ilişkisi

Bağlayıcıların kompleks modülleri düşük ve yüksek frekans değerinde katkı oranının değişimi ile benzer performans göstermektedir. Ancak sıcaklığın artması ile Sasobit modifikasyonunda eğrilerin yatıklaştığı görülmektedir. Yüksek sıcaklıkta SBS modifikasyonunda düşük sıcaklıkta olduğu gibi kompleks modüllerinde katkı oranının artması ile üstel bir artış meydana gelirken, Sasobit modifikasyonunda bu etki oluşmamaktadır. %4 SBS modifikasyonu %4 Sasobit modifikasyonundan 50 °C’de 0.1 ve 1 Hz frekansta sırasıyla 2.05 ve 1.75 kat; 80 °C’de 0.1 ve 1 Hz frekansta sırasıyla 3.33 ve 3.12 kat daha yüksek çıkmıştır. Modifiye bağlayıcıların kompleks modüllerinin saf bağlayıcınıninkine bölünmesi ile elde edilen modifikasyon indislerinin sıcaklıkla değişimi Şekil 6.23’te verilmiştir.

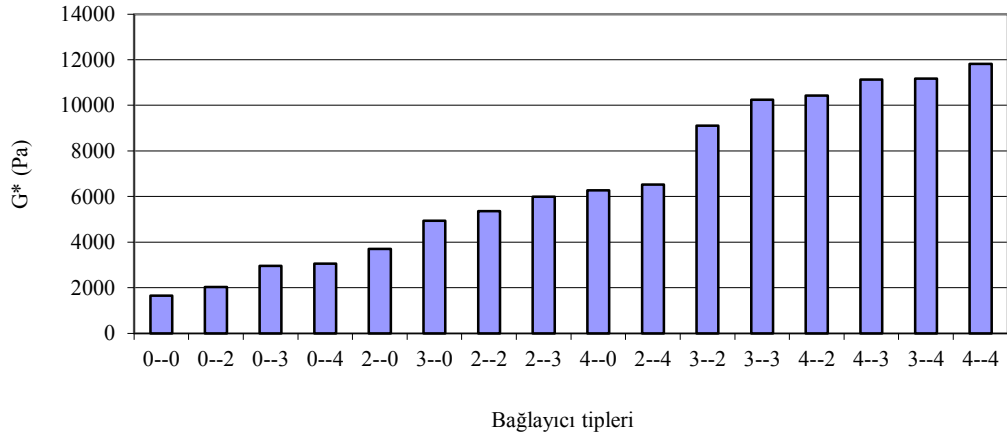


Şekil 6.23. 0,1 Hz’de modifikasyon indisinin sıcaklıkla değişimi

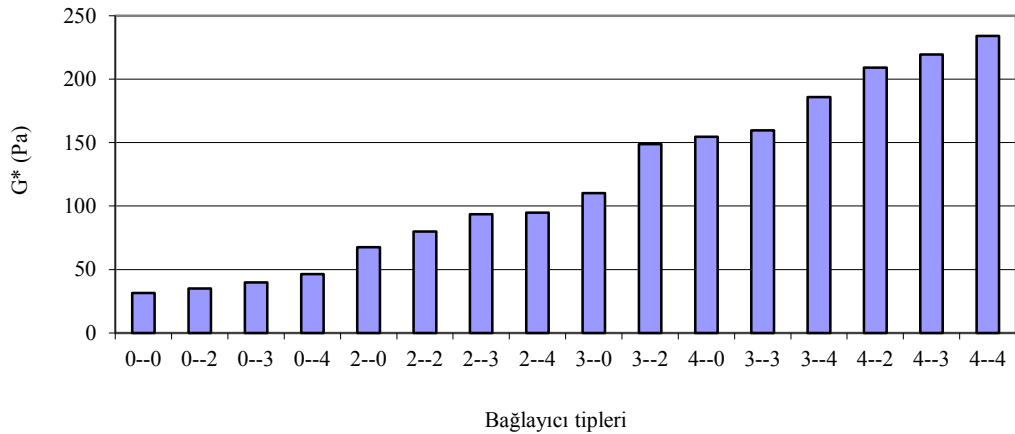


Sıcaklığın artması ile Sasobit modifikasyonunda kompleks modüllerinde meydana gelen artış oranı azalırken, %2 SBS modifikasyonunda pek fazla değişmemekte, %3 ve %4 SBS modifikasyonunda ise artmaktadır. %4 SBS modifikasyonunun saf bağlayıcıya göre kompleks modülü 0.1 Hz’de 50 °C ve 80 °C’de sırasıyla 3.79 ve 4.92 kat artmaktadır. %4 Sasobit modifikasyonunda ise bu oranlar 1.86 ve 1.47 kat olmaktadır.

Modifiye bağlayıcıların kompleks modüllerinin küçükten büyüğe doğru sıralanması durumunda aynı sıcaklıklarda 0.1 Hz ve 1 Hz’de sıralamanın değişmediği tespit edilmiştir. Şekil 24 ve 6.25’te sırasıyla 50 °C ve 80 °C’lerdeki sıralamalar verilmiştir.



Şekil 6.24. 50 °C bağlayıcı tipleri- G\* ilişkisi



Şekil 6.25. 80 °C bağlayıcı tipleri- G\* ilişkisi

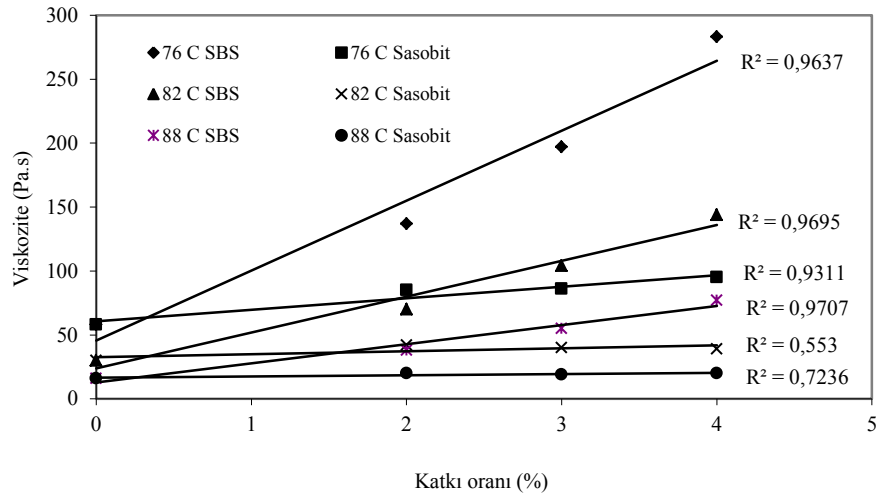
Her iki sıcaklıkta da en düşük 4 değere sadece Sasobit modifiyeli bağlayıcılar sahip olmuştur. En yüksek 5 değere ise sıralamasında küçük bir farkla aynı tip bağlayıcılar sahip olmuştur. Bu grafikten benzer kompleks modülü veren farklı tipteki bağlayıcı kombinasyonlarını belirlemek mümkün olmaktadır. 50 °C’de %4 SBS modifikasyonunun performansına %2 SBS+%4 Sasobit modifikasyonu ile %3 SBS modifikasyonunun performansına %2 SBS+%2 Sasobit modifikasyonu ile ulaşılabilir. Bir başka ifade ile bu sıcaklıkta SBS modifikasyonunda azaltılan her 1 birim SBS oranına karşılık bu oranla birlikte 2 birim Sasobit kullanılması gerekmektedir. 80 °C’de ise %4 SBS modifikasyonunun performansına % 3SBS+%3 Sasobit modifikasyonu ile ulaşılabilir. Bu da yüksek sıcaklıkta azaltılan SBS oranına karşılık performansta düşme olmaması için orta sıcaklıktakinden daha fazla Sasobit kullanılması gerektiğine işaret etmektedir. Sasobit katkısı tek başına kullanıldığı zaman kompleks modülü üzerinde pek fazla bir etkiye sahip değilken SBS modifikasyonu içinde kullanılması durumunda SBS katkısının etkinliğini önemli derecede artırmaktadır.

DSR deneyinde ayrıca sabit kesme viskozitesi ve faz açısı yöntemlerine göre bağlayıcıların karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları da tespit edilmiştir.

Sabit kesme viskozitesi yönteminde bağlayıcıların viskozitesi DSR deney aletinde 500 mikron açıklığa sahip 25 mm’lik paralel plaklar arasına yerleştirilen numunelere 76, 82 ve 88 °C’lerde 500 Pa gerilme uygulanarak tespit edilmiştir. Elde edilen viskozite değerlerin logaritmik ölçekte sıcaklığa karşı grafiği çizilerek karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları sırasıyla  $0,17 \pm 0,02$  Pa.s ve  $0,35 \pm 0,03$  Pa.s viskozitelere karşılık gelen sıcaklıklar olarak belirlenmiş ve sonuçlar Tablo 6.7’de verilmiştir. Bağlayıcıların katkı oranına karşılık viskozitelerinde meydana gelen değişim Şekil 6.26’da verilmiştir. SBS modifikasyonunda katkı oranı ile birlikte bütün sıcaklıklarda viskozite artmaktadır. %4 SBS ilavesi saf bağlayıcının viskozitesini bütün sıcaklıklarda ortama 4,8 kat artırmaktadır. Sasobit modifikasyonunda %4 Sasobit ilavesi viskoziteyi 76, 82, 88 °C’de sırasıyla %63, %30 ve %24 artırmaktadır.

**Tablo 6.7.** Sabit kesme viskozitesi deney sonuçları

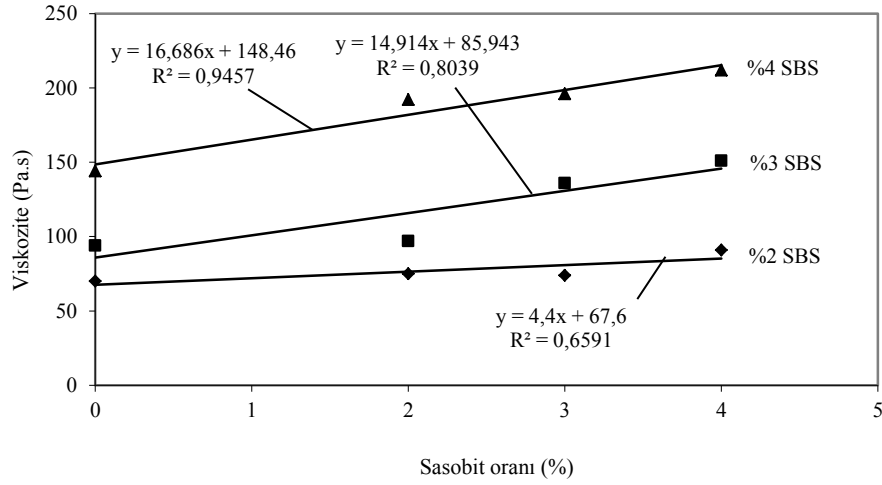
SBS-Sasobit oranı	Viskozite (Pa.s)			Sıcaklıklar (°C)	
	76 (°C)	82 (°C)	88 (°C)	Karıştırma	Sıkıştırma
0 - 0	58	30	16	147,9	136,2
0 - 2	85	42	20	143,0	133,0
0 - 3	85	40	19	139,5	129,9
0 - 4	95	39	20	137,5	128,5
2 - 0	137	70	38	163,1	150,2
2 - 2	158	75	37	151,6	141,1
2 - 3	160	74	37	150,6	140,2
2 - 4	202	91	43	148,8	139,0
3 - 0	197	94	55	171,0	157,4
3 - 2	204	97	42	157,0	146,4
3 - 3	294	136	65	153,2	143,4
3 - 4	354	151	72	146,2	136,7
4 - 0	283	144	77	175,0	161,4
4 - 2	394	192	95	169,7	157,6
4 - 3	477	196	94	169,0	156,9
4 - 4	458	212	109	155,1	145,3



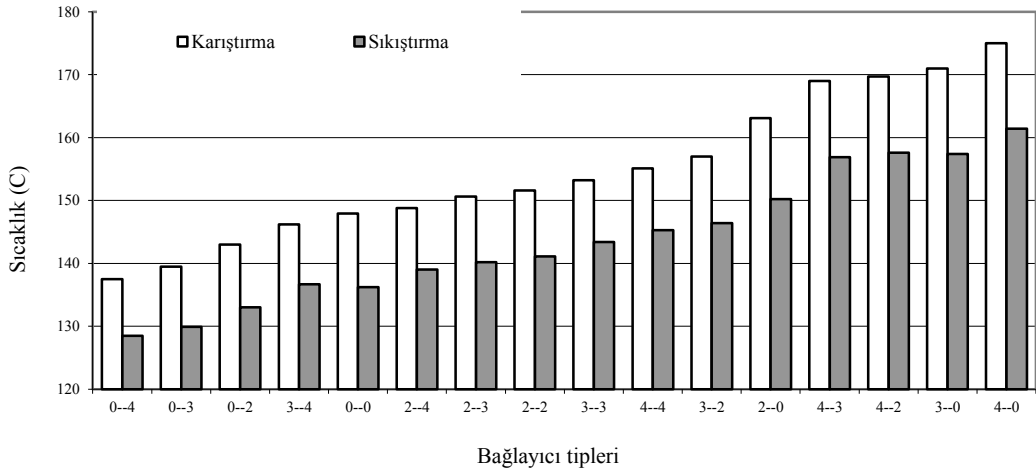
**Şekil 6.26.** Katkı oranı-viskozite ilişkisi

Katkıların birlikte kullanımının viskozite üzerindeki etkisi 82 °C için Şekil 6.27’de verilmiştir. Bu deney yönteminde Sasobit, SBS modifiyeli bağlayıcıların viskozitesini düşürememekte ancak çok fazla artmasına engel olmaktadır. Şekil 6.28’de bütün bağlayıcı tiplerinin karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları küçükten büyüğe doğru sıralanmıştır. En yüksek ve en düşük sıcaklıklara sırasıyla %4 SBS ve %4 Sasobit modifiyeli bağlayıcılar sahip olmuştur. %4 SBS modifikasyonuna %4 Sasobit ilavesi karıştırma-sıkıştırma

sıcaklığını ortalama 18 °C düşürmektedir. %3 SBS modifikasyonuna %4 Sasobit ilavesi ise karıştırma-sıkıştırma sıcaklığını ortalama 22 °C düşürmektedir.



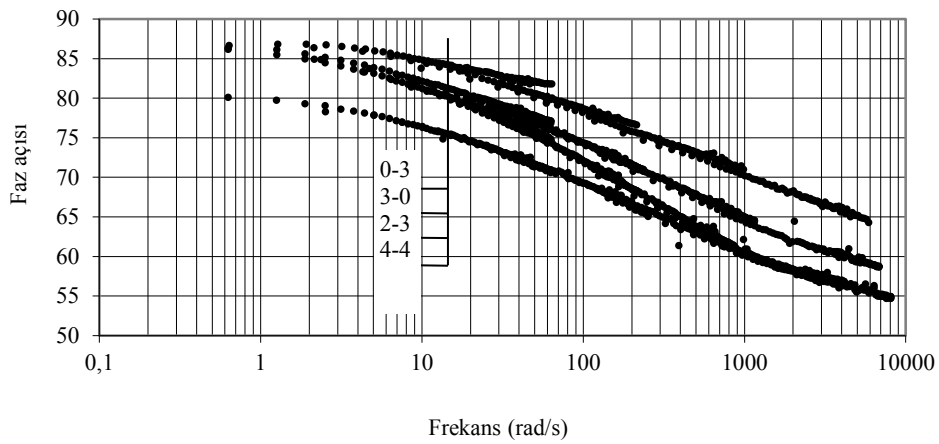
Şekil 6.27. 82 °C’de katkıların birlikte kullanımının viskoziteye etkisi



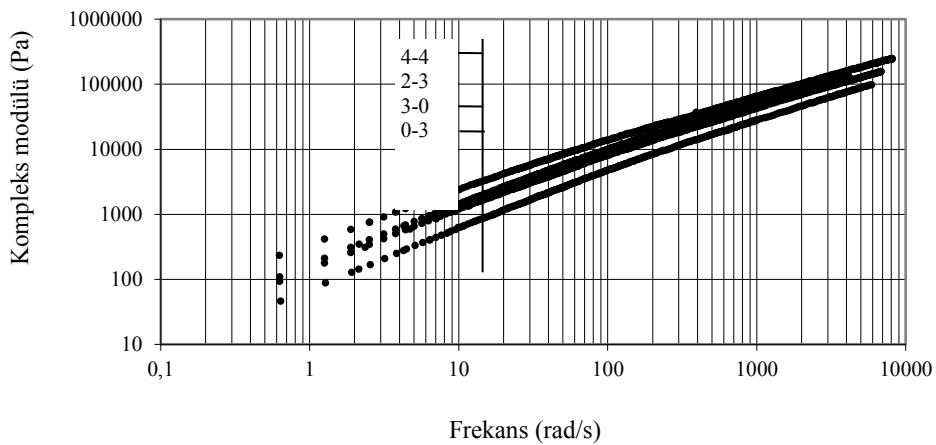
Şekil 6.28. Bağlayıcı tiplerine göre karıştırma-sıkıştırma sıcaklıklarındaki değişim

Bağlayıcıların karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarını tespit etmek için kullanılan faz açısı yönteminde DSR deney aletine 1 mm açıklık ve 25 mm çapa sahip olacak şekilde yerleştirilen bağlayıcıya 0,1 – 10 Hz (0,636 – 62,831 rad/s) frekans aralığında ve 50-60-70-80 °C’lerde %12 şekil değiştirme seviyesinde dinamik kesme deneyi uygulanmıştır. Her bir sıcaklıktan elde edilen faz açısı ve kompleks modülü değerleri Arrhenius bağıntısı ile 80 °C referans sıcaklığına dönüştürülmüştür. Şekil 6.29 ve 6.30’da 16 kombinasyon içinden seçilmiş 4 bağlayıcının frekans-faz açısı ve frekans-kompleks modülü ilişkileri verilmiştir.

Frekansın artması ile faz açıları azalırken kompleks modülleri artmaktadır. En düşük faz açısı değerine %4 SBS ve %4 Sasobit'in beraber kullanıldığı bağlayıcı, en yüksek faz açısı değerine ise sadece %3 Sasobit'in kullanıldığı bağlayıcı sahip olmuştur. Deneye tabi tutulan toplam 16 farklı kombinasyondaki bağlayıcılardan 8 tanesi 86 °C faz açısını görürken 8 tanesi daha sonra tek frekans (0,01 rad/s) değerinde bile esnek davranış sergileyerek bu faz açısı değerine gelmemiştir. Tablo 6.8'de gerekli faz açısını sağlayan bağlayıcıların karıştırma-sıkıştırma sıcaklıkları verilmiştir.



Şekil 6.29. Bağlayıcıların faz açısı- frekans ilişkisi



Şekil 6.30. Bağlayıcıların kompleks modülü- frekans ilişkisi

**Tablo 6.8.** Faz açısı yöntemine göre karıştırma sıkıştırma sıcaklıkları

Karışım Tipi	Frekans rad/s (86 °C faz açısında)	Sıcaklıklar °C	
		Karıştırma	Sıkıştırma
0 - 0	13,44	156,1	143,8
0 - 2	5,75	158,5	145,4
0 - 3	5,09	158,8	145,6
0 - 4	3,15	160,0	146,6
2 - 0	4,4	159,2	145,9
2 - 2	1,25	162,2	148,4
2 - 3	1,25	162,2	148,4
3 - 0	0,800	163,3	149,3
3 - 2	0,858	163,1	149,2

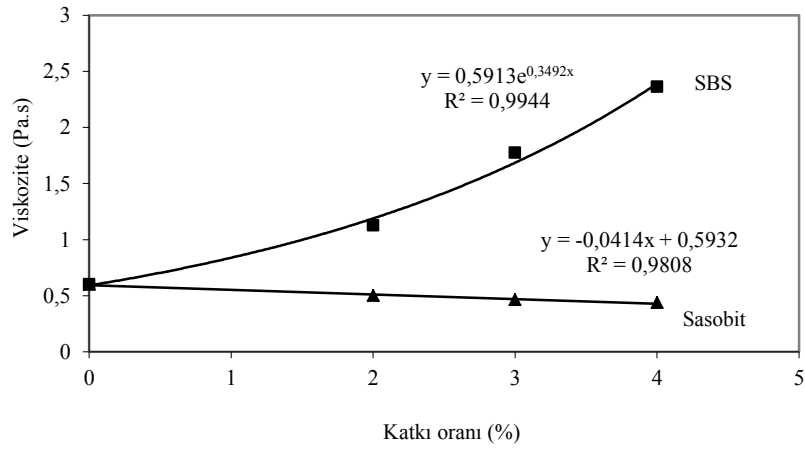
### 6.3.4 Dönel Viskozimetre Deney Sonuçları

Bu deneyde 135°C ve 165°C’de belirlenen viskozitelerin logaritmik ölçekte birleştirilmesi ile elde edilen doğrudan, karışımların karıştırma-sıkıştırma sıcaklıkları sırasıyla  $0,17 \pm 0,02$  Pa.s ve  $0,28 \pm 0,03$  Pa.s viskozitelere karşılık gelen sıcaklıklar olarak tespit edilmiş ve sonuçlar Tablo 6.9’da verilmiştir.

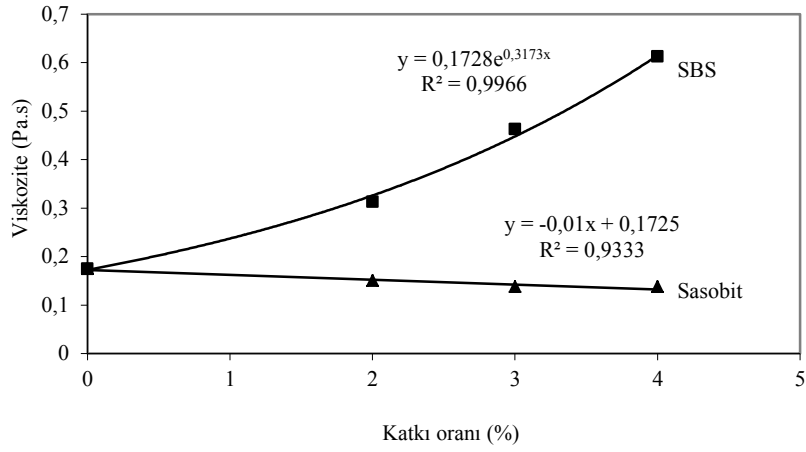
**Tablo 6.9.** Dönel viskozimetre deney sonuçları

SBS-Sasobit oranı	Viskozite (Pa.s)		Sıcaklıklar (°C)	
	135 (°C)	165 (°C)	Karıştırma	Sıkıştırma
0 - 0	0,600	0,175	165,8	152,8
0 - 2	0,500	0,150	161,6	148,6
0 - 3	0,462	0,137	159,9	147,3
0 - 4	0,437	0,137	158,8	145,6
2 - 0	1,125	0,312	182,0	168,3
2 - 2	1,113	0,300	180,4	167,2
2 - 3	1,000	0,287	179,8	165,9
2 - 4	0,950	0,275	178,0	164,2
3 - 0	1,775	0,462	191,8	178,1
3 - 2	1,550	0,412	188,2	174,5
3 - 3	1,463	0,387	186,9	173,4
3 - 4	1,400	0,375	186,7	173,1
4 - 0	2,363	0,612	199,3	185,1
4 - 2	2,113	0,562	197,0	182,7
4 - 3	2,038	0,512	193,6	180,0
4 - 4	1,888	0,437	188,4	175,0

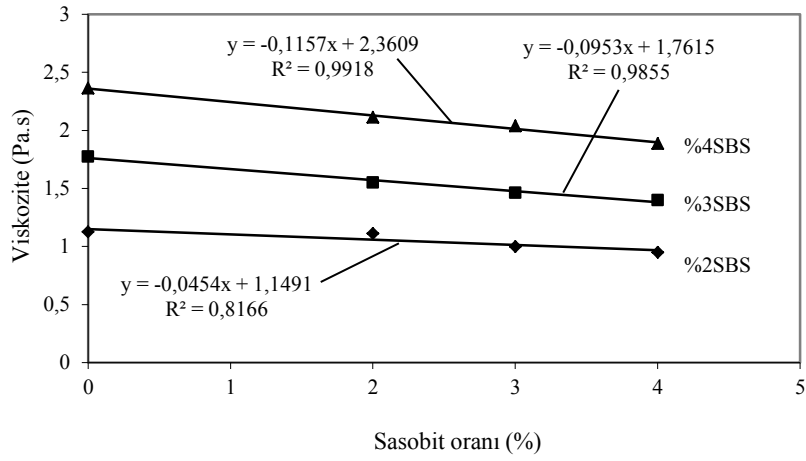
Katkıların ayrı ayrı olarak kullanılması durumunda 135 °C ve 165 °C'deki viskozite üzerindeki etkileri sırasıyla Şekil 6.31 ve 6.32'de verilmiştir. Şekillerden görüldüğü üzere SBS oranının artması ile viskozite üstel bir şekilde artarken, Sasobit oranının artması ile doğrusal olarak azalmaktadır. Şekil 6.33'te aynı karışım içinde SBS ile beraber Sasobit kullanımının 135 °C'deki viskoziteye etkisi verilmiştir. Sadece SBS modifikasyonu viskoziteyi artırırken ve sadece Sasobit modifikasyonu viskoziteyi düşürürken, SBS ile beraber Sasobit kullanımında, Sasobit daha etkin rol üstlenerek viskozitenin düşmesine neden olmaktadır. Şekil 6.33'ten görüldüğü üzere %2, %3 ve %4 SBS modifikasyonunda aynı zamanda Sasobit kullanılması durumunda, Sasobit oranının artması ile beraber viskozite lineer bir şekilde azalmaktadır. Şekil 6.33'teki doğruların eğimleri büyükten küçüğe doğru sırasıyla %4 SBS, %3 SBS ve %2 SBS doğrularına aittir. %4 SBS eğrisinde eğimin fazla olması, Sasobitin yüksek oranda SBS modifikasyonunda viskoziteyi düşürme üzerinde daha etkili olduğuna işaret etmektedir. Benzer eğilim 165 °C'deki viskoziteler içinde söz konusudur.



Şekil 6.31. 135 °C deki dönel viskozite değerleri



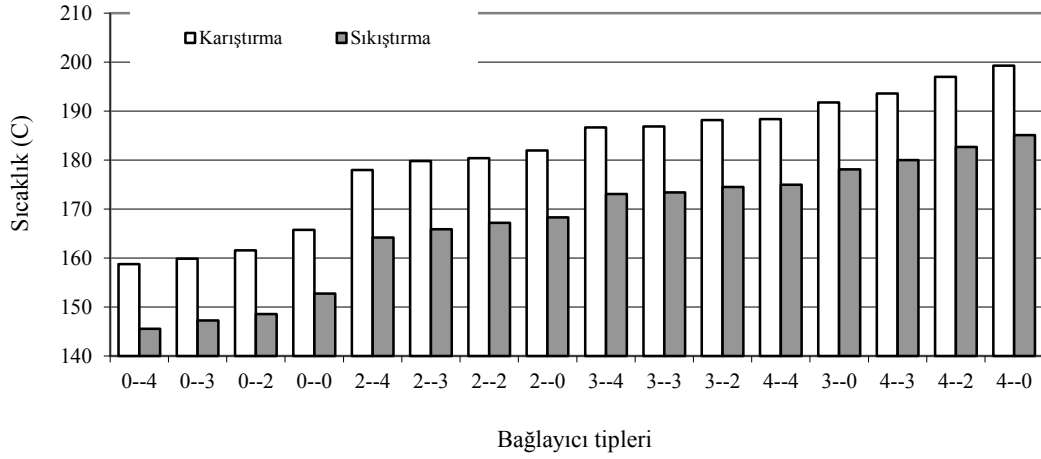
Şekil 6.32. 165 °C deki dönel viskozite değerleri



Şekil 6.33. SBS modifikasyonunda Sasobitin etkisi

Şekil 6.34'te bütün bağlayıcıların karıştırma-sıkıştırma sıcaklıkları küçükten büyüğe doğru bir arada verilmiştir. Saf bağlayıcıya %2, %3 ve %4 oranında Sasobit ilavesi karıştırma-sıkıştırma sıcaklıklarını ortalama 4,2 °C, 5,7 °C ve 7,2 °C düşürmektedir. Saf bağlayıcıya %2, %3 ve %4 oranında SBS ilavesi karıştırma-sıkıştırma sıcaklıklarını ortalama 15,8 °C, 25,6 °C ve 33 °C artırmaktadır.

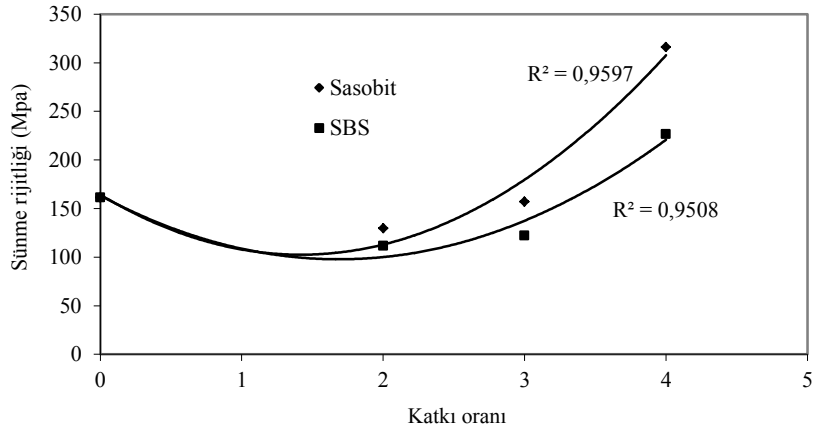




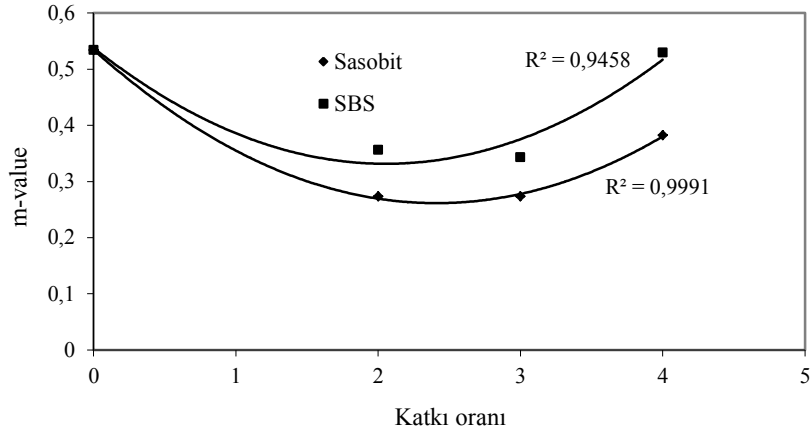
Şekil 6.34. Dönel viskozite yönteminde bağlayıcıların karıştırma-sıkıştırma sıcaklıkları

### 6.3.5 BBR Deney Sonuçları

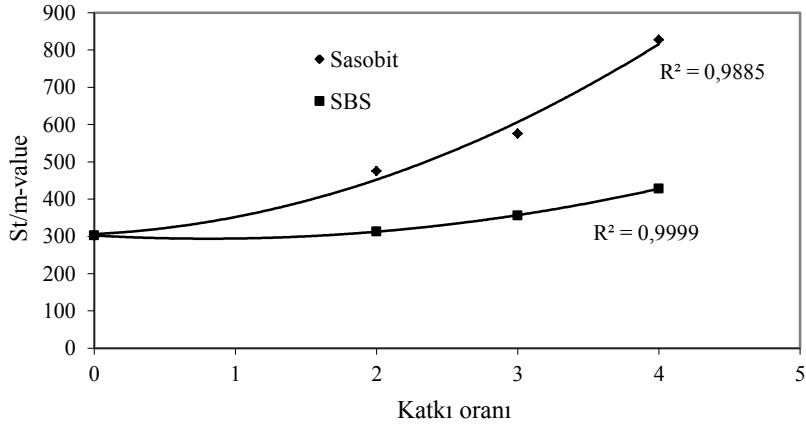
–18 °C’de yapılan BBR deneyinde saf ve modifiye bağlayıcıların sünme rijitlikleri (S) ve m-value ve S/m-value değerleri tespit edilmiştir. Katkıların ayrı olarak kullanılmasının sünme rijitliğine, m-value değerlerine ve S/m değerlerine etkileri sırasıyla Şekil 6.35, 6.36 ve 6.37’de verilmiştir.



Şekil 6.35. Katkı oranı- sünme rijitliği ilişkisi



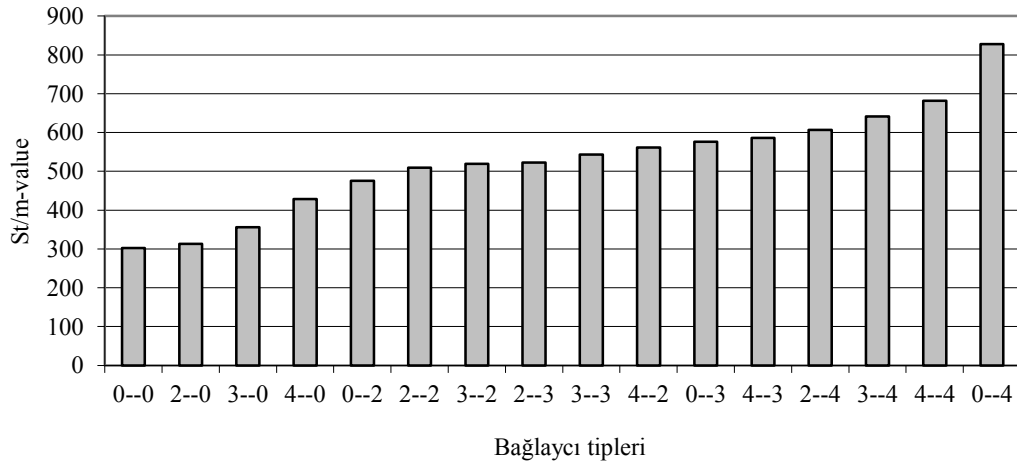
Şekil.6.36. Katkı oranı- m-value ilişkisi



Şekil.6.37. Katkı oranı- S/m ilişkisi

Her iki katkıının da %3 oranından sonra bağlayıcıların rijitliğinin artmasına neden olduğu tespit edilmiştir. %4 Sasobit ve SBS oranı bağlayıcının rijitliğini saf bağlayıcıya göre sırasıyla %95 ve %40 oranında artırmaktadır. Katkı oranının artması ile birlikte Sasobit ve SBS modifiyeli bağlayıcıların rijitlikleri arasındaki fark önemli derecede artmaktadır. m-value değerlerine bakıldığında aynı şekilde SBS modifikasyonunun daha yüksek değerler vererek rijitliği Sasobit modifikasyonu kadar üzerinde tutmadığı görülmektedir. Elastik davranışı en iyi temsil eden S/m değerlerinin katkı oranı ile değişimine bakıldığında, Sasobit modifikasyonunun S/m değerlerinin SBS modifikasyonuna göre katkı içeriği ile daha fazla arttığı, dolayısıyla daha az esnek davranış sergilediği görülmektedir. Bütün bağlayıcıların S/m değerlerindeki değişim Şekil 6.38'de verilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere en düşük S/m değerlerine yani en yüksek elastikiyet

değerlerine sadece SBS ile modifiye edilen bağlayıcılar sahip olurken en rijit davranışı sadece %4 Sasobit modifiyeli bağlayıcı vermiştir. Sasobit katkısı ile birlikte SBS kullanılması Rijitlik artışına çok fazla katkıda bulunmamaktadır. %3 Sasobit modifiyeli bağlayıcının rijitliği ile %4SBS+%3Sasobit bağlayıcısının rijitlikleri hemen hemen aynı çıkmıştır. Özellikle düşük orandaki SBS katkısı Sasobit modifikasyonunun neden olduğu rijitlik artışını azaltabilmektedir. %4 Sasobit modifikasyonunun rijitliği aynı karışıma %2 SBS ilavesi ile %27 oranında azalmaktadır. % 3SBS+%3 Sasobit bağlayıcısı dikkate alınan kombinasyonlar içinde en düşük ve en yüksek değerlerin ortasında bir rijitlik sunmuştur.



Şekil 6.38. Bütün bağlayıcıların S/m-value değerlerindeki değişim

#### 6.4. Bitümlü Sıcak Karışım Numuneleri Üzerinde Uygulanan Deney Sonuçları

Çalışmanın bu bölümünde modifiye bağlayıcılarla hazırlanan karışım numuneleri üzerinde deneyler yapılmıştır. Numune tipi olarak saf karışımın (0-0) haricinde 0-3, 3-0 ve 3-3 bağlayıcıları ile hazırlanan karışımlar ele alınmıştır. Bu karışımlarda bağlayıcılar ile aynı gösterimle temsil edilmiştir.

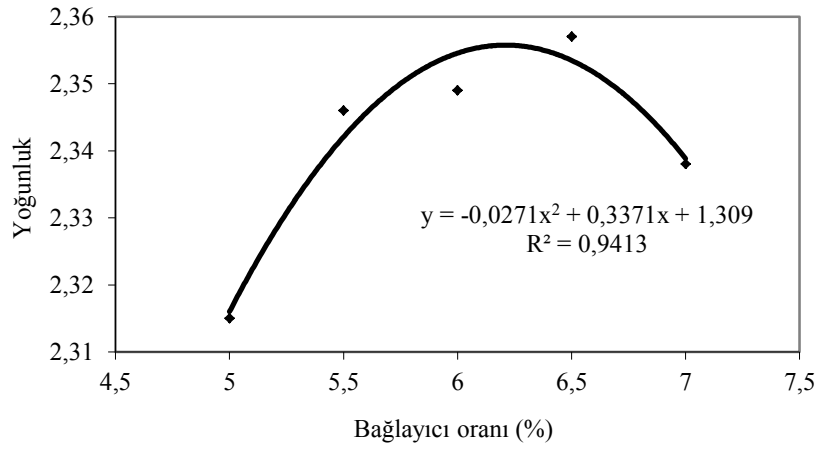
##### 6.4.1 Optimum Bitüm Oranının Belirlenmesi

Optimum bitüm içeriği saf karışımlar için Marshall yöntemine uygun olarak numunelerin her iki yüzüne 50 darbe uygulanarak belirlenmiş olup farklı bitüm içeriklerinde hazırlanan numunelerin ortalama stabilite, akma ve hacimsel değerleri Tablo

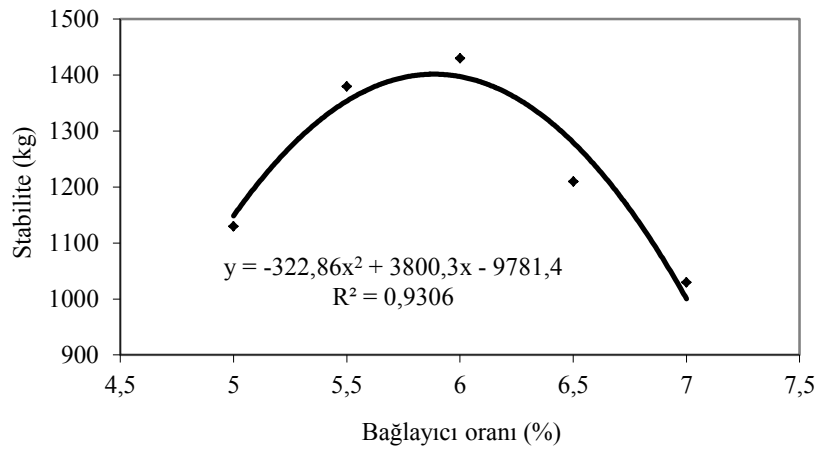
6.10’da verilmiştir. İlgili özelliklerin bitüm içeriği ile değişimi grafiksel olarak Şekil 39-Şekil 44’de verilmiştir.

**Tablo 6.10.** Katkısız TMA karışımlarının farklı bitüm içeriklerindeki özellikleri

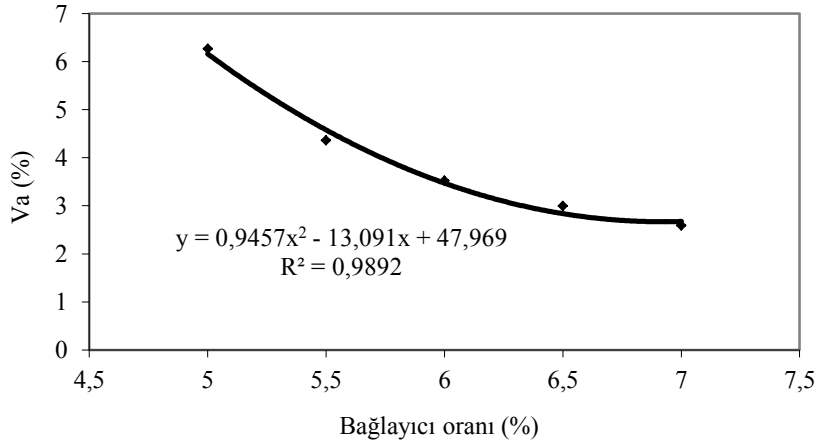
Wa (%)	Va (%)	VFA (%)	Gmb (%)	VMA (%)	Stabilite (kg)	Akma (mm)
5	6.26	60.3	2.315	15.79	1130	2.06
5.5	4.36	71.5	2.346	15.06	1380	2.41
6	3.52	77.2	2.349	15.06	1430	2.65
6.5	2.99	80.58	2.357	16.03	1210	3.58
7	2.59	83.4	2.338	16.65	1030	4.15



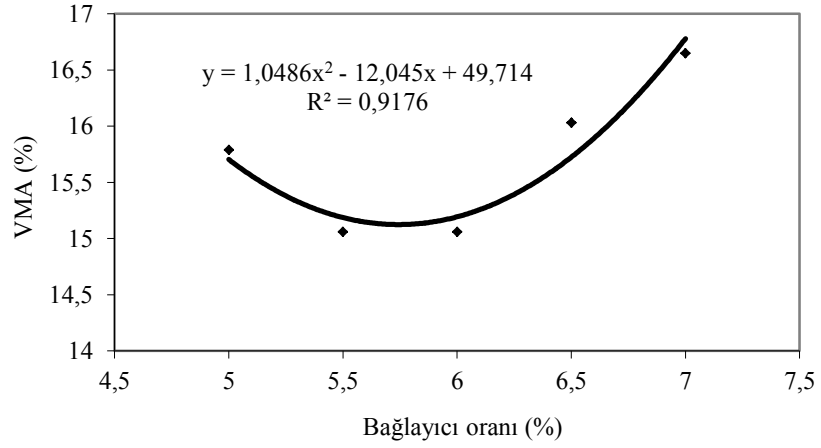
**Şekil 6.39.** Yoğunluk – bağlayıcı oranı ilişkisi



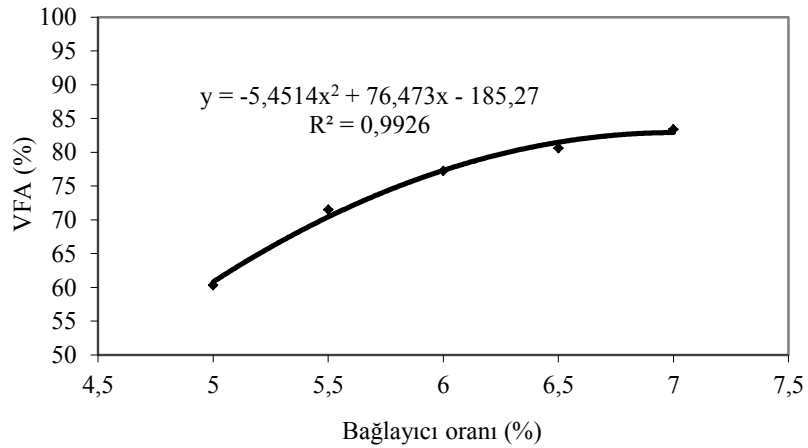
**Şekil 6.40.** Stabilite – bağlayıcı oranı ilişkisi



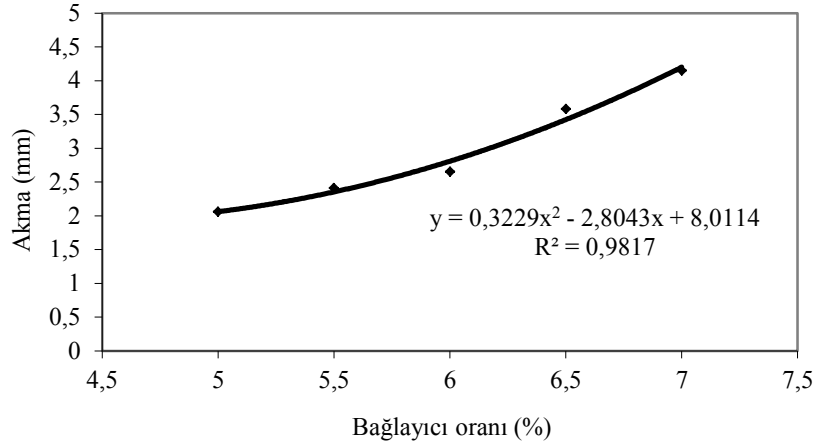
Şekil 6.41. Boşluk yüzdesi - bağlayıcı oranı ilişkisi



Şekil 6.42. Agregalar arası boşluk yüzdesi – bağlayıcı oranı ilişkisi



Şekil 6.43. Asfaltla dolu boşluk yüzdesi – bağlayıcı oranı ilişkisi



**Şekil 6.44.** Akma – bağlayıcı oranı ilişkisi

Taş mastik asfalt karışımların optimum bitüm içeriğinin belirlenmesinde boşluk oranının ortalama %3 ve agregalar arası boşluk oranının ise minimum %16 olması istenmektedir. Şartname kriteri olan %2 ile %4 boşluk oranı alt ve üst limitleri %5.7 ile %7.0'nin üstündeki bitüm içeriklerinde elde edilmektedir. Minimum VMA kriteri ise %6.5 bitüm içeriğinden büyük değerler için elde edilebilmektedir. Buna göre saf karışımın optimum bitüm içeriği %6.5 olarak seçilmiş ve bu bitüm içeriğindeki özellikler Tablo 6.11'de verilmiştir.

**Tablo 6.11.** %6.5 bitüm içeriğindeki özellikler

Özellikler	Değerler	Görüşler
VMA	16.03	Min.%16 şartını sağlamakta
Va	3.07	Ortalama %3 şartını sağlamakta
Stabilite	1230	Maksimum stabilitenin %86'sını sağlamakta. Yoğun gradasyon için geçerli plan min.900 kg'ın üstünde
Akma	3.4	Yoğun gradasyon için geçerli olan 2-4 mm şartını sağlamakta.
Yoğunluk	2.347	Maksimum yoğunluğun %99'unu sağlamakta

#### 6.4.2 Marshall Stabilite ve Akma Deney Sonuçları

Herbir karışım tipi için Marshall stabilite ve akma değerleri Tablo 6.12'de verilmiştir. Tablodaki değerler üç ölçümün ortalama değerleridir. Çalışmada 30 dakika 60 °C'de

bekletilen (koşullandırılmamış) numunelerin yanı sıra 24 saat 60 °C’de bekletilen numunelerinde (koşullandırılmış) stabilite ve akma değerleri tespit edilmiştir. Koşullandırılmamış 0-3, 3-0, ve 3-3 numunelerinin stabiliteleri saf karışımdan sırasıyla %2.5, %7.34 ve %14.6 daha yüksek çıkmıştır. Bu artışlar koşullandırılmış numunelerde %22.6, %24.6 ve %29.5 olmaktadır. Katkıların stabiliteyi iyileştirme üzerindeki etkisi koşullandırılmış numunelerde daha fazla olmaktadır. Bunun nedeni ise saf karışımın koşullandırma sonrasında stabilitesini %24 oranında kaybederken katkılı karışımlarda bu kaybın %8 ile %14 arasında olmasından kaynaklanmaktadır. %3 SBS +%3 Sasobit karışım hem koşullandırmada hemde koşullandırılmamış durumda en yüksek Marshall oranı (MQ) değerlerini vermiştir. Katkıların birlikte kullanımı karışımın stabilitesini artırmakta ve yüksek akma değerlerini önleyerek yüksek MQ değerleri vermektedir.

Numunelerin koşullandırılmamış durumdaki stabilitelerinin koşullandırılmış durumdaki stabilitelerine oranından kalıcı Marshall stabiliteleri (RMS) tespit edilmiştir. Saf karışım %76 ile en düşük kalıcı Marshall stabilitesini vermiştir. Modifiyeli karışımların kalıcı Marshall stabilite değerlerinde çok önemli bir farklılık oluşmamakla birlikte en yüksek değeri %91 ile sadece %3 Sasobit modifiyeli karışım vermiştir. Bunun nedeninin Sasobitin viskoziteyi düşürerek daha iyi bir adezyon sergilediği olarak düşünülmektedir. Sadece Marshall stabiliteleri yerine akmanın da değerlendirildiği MQ değerlerinin karşılaştırılması katkıların etkinliğini daha açık şekilde ortaya koyabilmektedir.

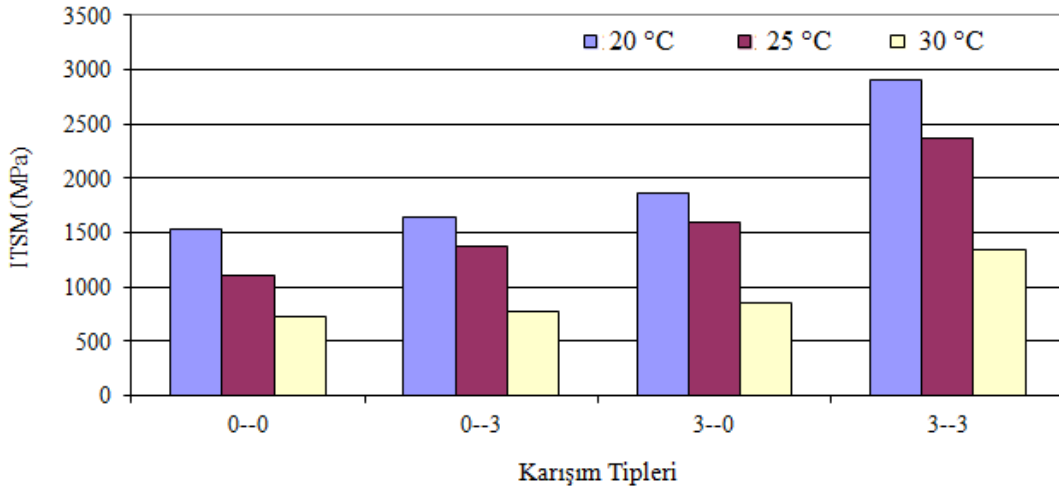
**Tablo 6.12.** Marshall stabilite ve akma değerleri

Karışım Tipleri	Stabilite (60 °C’de 30 dk) MS <sub>1</sub> (kN)	Akma, F <sub>1</sub> (mm)	MQ <sub>1</sub> MS <sub>1</sub> /F <sub>1</sub>	Stabilite (60°C’de 24sa) MS <sub>2</sub> (kN)	Akma, F <sub>2</sub> (mm)	MQ <sub>2</sub> MS <sub>2</sub> /F <sub>1</sub>	RMS MS <sub>2</sub> /MS <sub>1</sub>
0--0	8.69	4.82	1.80	6.65	5.65	1.18	76.52
0--3	8.91	4.41	2.02	8.16	6.52	1.25	91.58
3--0	9.33	4.03	2.32	8.29	5.89	1.41	88.85
3--3	9.97	4.16	2.40	8.63	4.7	1.84	86.56

### 6.4.3 İndirek Çekme Rijitlik Modülü Deney Sonuçları

Deneylerde her bir karışım tipi için üçer numune test edilmiştir. Ölçümlerde her bir numune üç ayrı yerinden test edilmiş ve sonuçta bir karışım tipi için 9 değerın ortalaması dikkate alınmıştır. Karışım tiplerinin 20, 25 ve 30 °C’lerdeki rijitlik modülleri Şekil

6.45’de verilmiştir. Karışımların rijitlik modüllerinin sıcaklığın artması ile düştüğü özellikle 30 °C’den sonra bu azalışın daha hızlı olduğu görülmektedir. Sıcaklığın 20 °C’ den 30 °C’ye çıkması durumunda bütün karışımların rijitliği yaklaşık %50 oranında azalmaktadır. %3 SBS + %3 Sasobit karışımı saf bağlayıcıdan her sıcaklıkta yaklaşık 2 kat fazla rijitlik değeri vermiştir. %3 SBS modifikasyonu ile birlikte %3 Sasobit kullanılması karışımın rijitliğini her sıcaklıkta yaklaşık %50 oranında artırmaktadır.



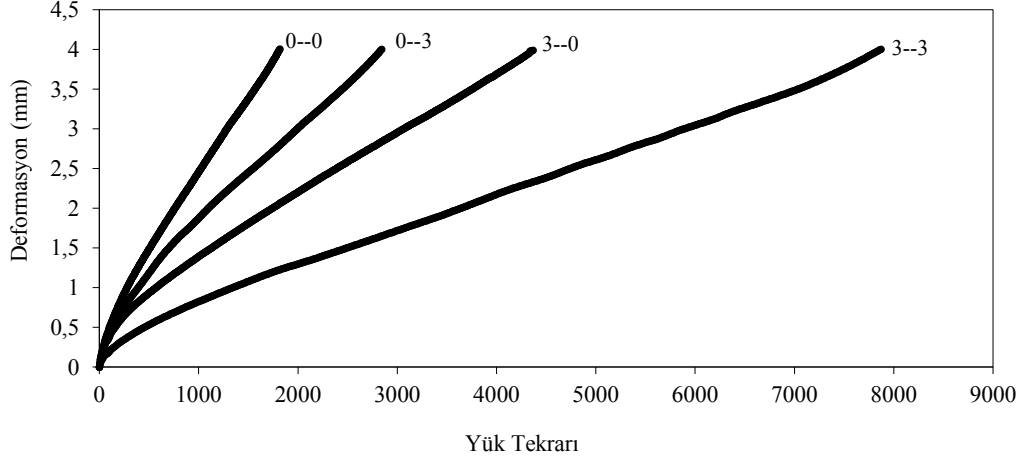
Şekil 6.45. Karışım tipleri-ITSM ilişkisi

#### 6.4.4 İndirek Çekme Yorulma Deney Sonuçları

Yorulma deneyinde numunelerin 4 mm deformasyon seviyesine ulaşması için gerekli yük tekrar sayıları belirlenmiştir. Her karışım tipi için üçer numune test edilmiştir. 4 mm deformasyon seviyesine ulaşmak için 0-0, 0-3, 3-0 ve 3-3 karışımlarının yük tekrar sayıları sırasıyla 1818, 2884, 4368 ve 7908 olarak tespit edilmiştir. Şekil 6.46’da yük tekrar sayısı ile deformasyon değişimi arasındaki ilişki ortalama değerlere en yakın olan numuneler için verilmiştir. Numunelerin yüksek oranda bitüm içermesi ve ortalama bir sıcaklık olan 20 °C’ de deneyin yapılmasından dolayı deformasyon eğrilerinin başlangıç bölümlerinde hızlı bir artış olmuş ve yaklaşık 4 mm deformasyon seviyesinde LVDT’ ler deformasyon kapasitelerini doldurmuştur. Bu sebepten karşılaştırmada 4 mm deformasyon seviyesi kullanılmıştır. Sadece %3 SBS ve %3 Sasobit modifiyeli karışımlar kontrol karışımından sırasıyla %58 ve 2.4 kat daha fazla yük tekrar sayıları vermiştir. %3 SBS+%3 Sasobit modifiyeli karışımlar en iyi performansı dergileyerek kontrol karışımından 4.3 kat daha



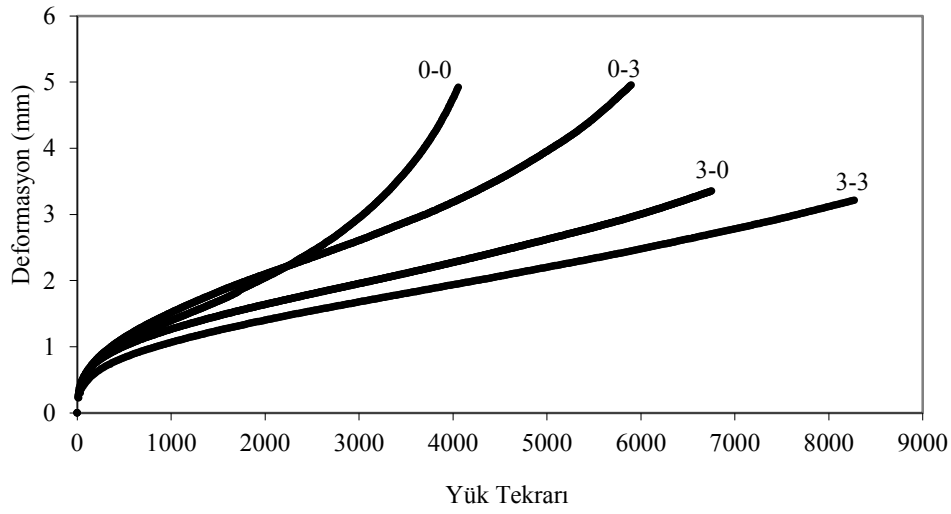
fazla yük tekrar sayısı sunmuştur. %3 SBS ile birlikte %3 Sasobit kullanılması bu katkının etkinliğini iki kat artırmıştır.



Şekil 6.46. Yorulma deneyinde yük tekrarı-deformasyon ilişkisi

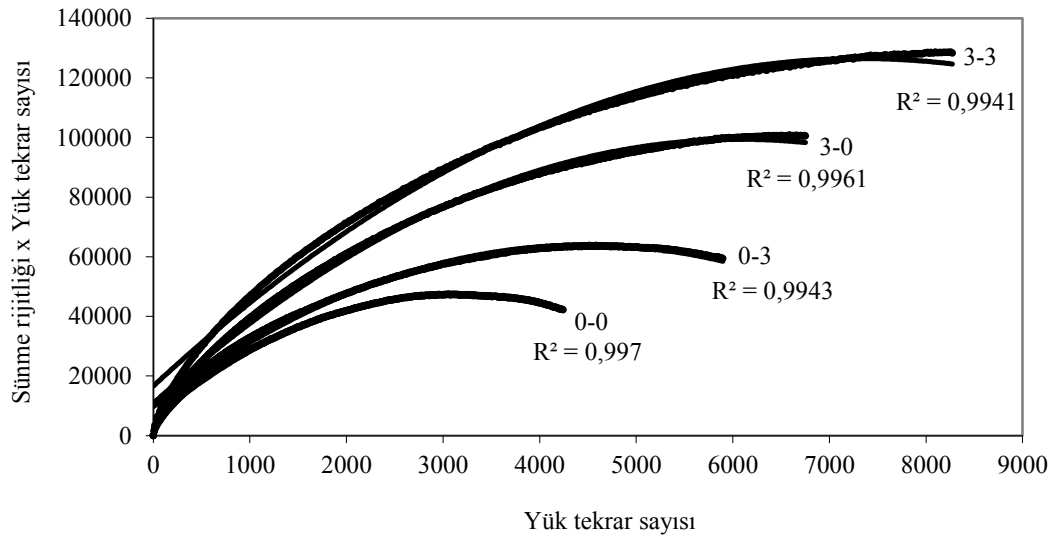
#### 6.4.5 Dinamik Sünme Deney Sonuçları

Şekil 6.47’de 50 °C ve 500 kPa gerilme seviyesinde yapılan deneyden elde edilen deformasyon ve yük tekrarı ilişkisi verilmiştir. Her karışım tipi için üçer numune test edilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere 0-0 ve 0-3 karışımları çok yüksek kalıcı deformasyon özelliği göstermektedir. Bu karışımlar ayrıca 3000 ve 4000 yük tekrarından sonra deformasyonların hızlı olarak artmaya başladığı üçüncü bölge olarak tanımlanan bölgeye geçmişler ancak 3-0 ve 3-3 karışımları 6500 ve 7500 yük tekrarında bile bu bölgeye geçmemişlerdir. Yük tekrarı LVDT’lerin kapasitelerini doldurmasına kadar devam etmiştir. 0-0 ve 0-3 karışımları 2500 yük tekrarına kadar benzer performans sergilemiş ancak üçüncü bölgeye geçme durumunda %3 Sasobit modifiyeli karışım kontrol karışımına göre yük tekrarına daha fazla direnç göstermiştir. Bütün karışımlar 3 mm deformasyon seviyesine ulaştığından yük tekrar sayıları bu deformasyon seviyesine göre karşılaştırılmıştır. 0-3, 3-0 ve 3-3 karışımlarının yük tekrar sayıları kontrol karışımından sırasıyla 1.30, 2.21 ve 2.72 kat daha fazla olmuştur. Sonuçlar %3 SBS + %3 Sasobit modifiyeli karışımının önemli derecede üstün performans sergilediğini göstermektedir.



Şekil 6.47. Dinamik sünme deneyinde yük tekrarı-deformasyon ilişkisi

Katkı maddelerinin etkinliği ayrıca saf ve modifiyeli karışımların akma sayılarını tespit ederek değerlendirilmiştir. Akma sayısı, yük tekrar sayısı ile sünme rijitliğinin çarpımının yük tekrar sayısına göre grafiğinin çizilmesi ile tespit edilmektedir. Burada elde edilen veriye ikinci derece polinomal bir eğri uydurulmakta ve bu eğrinin maksimum noktasına karşılık gelen yük tekrar sayısı akma sayısı olarak belirlenmektedir. Her bir karışım tipine ait birer numunenin eğrisi Şekil 6.48’de verilmiştir. Yüksek belirleme katsayısına sahip eğriler dönüm noktasının tespit edilmesine olanak sağlamaktadır. 0-3, 3-0 ve 3-3 karışımları kontrol karışımına göre sırasıyla 1.43, 1.93 ve 2.39 kat daha fazla akma sayısı vermiştir. Katkıların etkinliğini belirlemede akma sayıları belirli bir deformasyona ulaşması için gerekli yük tekrar sayılarının belirlenmesinden daha etkin olmaktadır. %3 SBS + %3 Sasobit modifiye karışımın deformasyonlara karşı daha az hassas olduğu ve böylece saf karışımlara göre ağır trafik yüklerine daha uzun süre direnç gösterebileceği tespit edilmiştir.



Şekil 6.48. Karışım tiplerinin akma sayıları

## 7. SONUÇLAR

Geleneksel bağlayıcı deney sonuçlarına göre Sasobit katkısının ayrı olarak kullanılması durumunda modifiye bağlayıcının yumuşama noktası önemli derecede artmaktadır. Isıya karşı duyarlılık bakımından da Sasobitin ayrı kullanımı daha etkili olmaktadır. Sasobit ile birlikte SBS kullanımı ısıya karşı duyarlılığın artması konusunda önemli bir etkisi olmamaktadır.

SBS modifikasyonunun tekerlek izi parametresi üzerinde Sasobit modifikasyonundan özellikle yüksek katkı oranlarında daha fazla etkili olduğu tespit edilmiştir. Yüksek sıcaklıkta SBS modifikasyonunun tekerlek izi parametresi azaltılan %1 SBS oranına karşılık %3 Sasobit ilavesi ile elde edilebilmektedir. %4 SBS+%4 Sasobit modifikasyonu tekerlek izi parametresi bakımından üstün performans sergilemektedir. Katkıların birlikte kullanımları durumunda Sasobit SBS modifikasyonunun esnekliğini artırma yönünde bir katkı sunmaktadır.

Katkı oranının artması ile kompleks modüllerinde meydana gelen artış değişik sıcaklık ve frekanslarda SBS modifikasyonunda üstel olurken Sasobit modifikasyonunda lineer olmaktadır. Katkıların birlikte kullanılmaları durumunda benzer kompleks modülü değerlerinin farklı kombinasyonlarla elde edilebileceği belirlenmiştir. Orta sıcaklıkta SBS modifikasyonunda azaltılan her 1 birim SBS oranına karşılık bu oranla birlikte 2 birim Sasobit kullanılması gerektiği, yüksek sıcaklıkta ise azaltılan SBS oranına karşılık performansta düşme olmaması için orta sıcaklıktakinden daha fazla Sasobit kullanılması gerektiği tespit edilmiştir.

DSR deneyinden edilen viskozite sonuçlarına göre katkıların aynı karışım içinde birlikte kullanılmaları durumunda Sasobit, SBS modifikasyonunun viskozitesini üstel bir şekilde artırmasına engel olarak bu artışı doğrusal bir hale getirmekte ve karıştırma-sıkıştırma sıcaklıklarını önemli ölçüde düşürmektedir

Dönel viskozimetrede sadece SBS modifikasyonunda karışımların viskozite değerleri katkı oranının artması ile birlikte üstel bir şekilde artarken sadece Sasobit modifikasyonunda lineer bir şekilde azalmaktadır. Ancak viskozitelerin dönel viskozimetreye göre daha düşük sıcaklıkta tespit edildiği sabit kesme viskozitesi yönteminde sadece Sasobit modifikasyonunda da azda olsa katkı oranı ile birlikte artış

olmaktadır. Bu da Sasobit katkısının viskoziteyi düşürme üzerindeki etkisinin yüksek sıcaklıklarda söz konusu olduğuna işaret etmektedir.

BBR deneyinden her iki katkının da %3 oranından sonra bağlayıcıların önemli derecede rijitliğinin artmasına neden olduğu bu artışın Sasobit modifikasyonunda daha etkili olduğu tespit edilmiştir. SBS modifikasyonu düşük sıcaklıkta, rijitliği, Sasobit modifikasyonu kadar üzerinde tutmadığı ve özellikle düşük orandaki SBS katkısının, Sasobit modifikasyonunun neden olduğu rijitlik artışını azaltabildiği tespit edilmiştir.

Marshall stabilite deneyine göre katkıların stabiliteyi iyileştirme üzerindeki etkisi koşullandırılmış numunelerde daha fazla olmaktadır. Stabilite açısından en yüksek değeri %3SBS + %3 Sasobit karışımı verirken kalıcı Marshall stabilitesi açısından en iyi değeri sadece %3 Sasobit modifiyeli karışım vermiştir.

Rijitlik modülü deneyine göre %3 SBS + %3 Sasobit karışımı saf bağlayıcıdan her sıcaklıkta yaklaşık 2 kat daha fazla rijitlik değeri vermiştir.

Yorulma deney sonuçlarına göre sadece %3 SBS ve %3 Sasobit modifiyeli karışımlar kontrol karışımından sırasıyla %58 ve 2.4 kat daha fazla yük tekrar sayıları vermiştir. %3 SBS+%3 Sasobit modifiyeli karışımlar en iyi performansı dergileyerek kontrol karışımından 4.3 kat daha fazla yük tekrar sayısı sunmuştur. %3 SBS ile birlikte %3 sasobit kullanılması bu katkının etkinliğini iki kat artırmıştır.

Dinamik sünme deneyinden %3 SBS + %3 Sasobit modifiye karışımının deformasyonlara karşı daha az hassas olduğu ve böylece saf karışımlara göre ağır trafik yüklerine daha uzun süre direnç gösterebileceği tespit edilmiştir.

Bu çalışmada kullanılan katkı maddeleri bitüm modifikasyonunda çok geniş bir aralıkta incelenmiş, karışım modifikasyonunda ise belirleyici bir karşılaştırma yapılabilecek kombinasyonları içerecek şekilde seçilmiştir. Daha sonraki çalışmalarda karışım deneylerinde de çok farklı kombinasyonların incelenmesi ve Sasobit katkısının başka polimerler ile değerlendirilmesi araştırmaya açık bir konudur.

## KAYNAKLAR

1. <http://www.kgm.gov.tr/SiteCollectionDocuments/KGMdocuments/Istatistikler/TrafikveUlasimBilgileri/12TrafikUlasimBilgileri.pdf> syf 205. Karayolları Trafik İstatistikleri.31 Aralık 2012.
2. **Bek, A.**, 2007. 2004 Yılında İstanbul-Ankara Devlet yolunda meydana gelen ölümlü, yaralanmalı trafik kazalarının hava durumu, yol sath durumu ve yoldaki yön durumuna bağlı olarak incelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
3. **Yayla, N.**, 2011. Karayolu Mühendisliği, Birsen Yayınevi, ISBN: 975-511-287-1, İstanbul.
4. **Kuloğlu N.**, 2009. Karayolu Mühendisliği Ders Notu, Fırat Üniversitesi.
5. **UMAR, F. ve YAYLA, N.**, 1994. Yol İnşaatı, İ.T.Ü İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul.
6. **Tunç, A.**, 2007. Yol Malzemeleri ve Uygulamaları, Nobel Yayın Dağıtım, ISBN 978-9944-77-216-7, Ankara.
7. **Saltan, M.**, 1999. Esnek üstyapıların analitik değerlendirilmesi. S.D.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, *Doktora Tezi*, 202s, Isparta.
8. **Karayolları Teknik Şartnamesi.**, 2013.
9. **Umar, F. ve Ağar, E.**, 1991. Yol Üstyapısı, İ.T.Ü İnşaat Fakültesi Matbaası, 339 s. İstanbul.
10. **Ağar, E., Umar, F.**, 1985. “Yol üstyapısı” İ.T.Ü İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul.
11. **Çetin, S.**, 2007. Afyon Karahisar bölgesi volkanik kayaların sıcak karışım asfalt kaplamalarında agrega olarak kullanılabilirliğinin araştırılması, A.K.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü, *Yüksek Lisans Tezi*, Afyon.
12. **Karavaşin, M. ve Ağar, E.**, 2004. Sathi kaplamalar üzerine bir değerlendirme, 4. *Ulusal Asfalt Sempozyumu*, Ankara, 25-26 Kasım, s. 131-140.
13. **Kuloğlu, N., Kök, B. V. ve Öndaş, M.**, 2004. Sathi kaplamalarda kusma olayına etki eden faktörler, 4. *Ulusal Asfalt Sempozyumu*, Ankara, 25-26 Kasım, s. 141-148.
14. **California Department of Transportation**, 2003. Maintance Technical Advisory Guide (MTAG), Office of Pavement Preservation, Division of Maintenance, USA. [http://www.dot.ca.gov/hq/maint/MTA\\_Guide.htm](http://www.dot.ca.gov/hq/maint/MTA_Guide.htm)

15. **Ilıcalı, M., Tayfur, S. ve Özen, H.,** 2001. Asfalt ve Uygulamaları, Seçil Ofset, İstanbul.
16. **Uluçaylı, M., ve Yavuz, A.,** 2002. Asfalt El Kitabı, Sistem Ofset, İstanbul.
17. **Atmaca, F.,** 2002. Sönmemiş kirecin (CaO) asfalt emülsiyonlu yoğun karışım asfalt betonu üzerindeki etkilerinin incelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, K.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
18. **Karpuz, O.,** 2000. Asfalt emülsiyonu ile hazırlanan soğuk karışımların stabiliteilerinin araştırılması, *Yüksek Lisans Tezi*, K.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
19. **Oruç, Ş.,** 1997. Torul kalker taşıdığı agregalarının asfalt betonu içerisindeki performansının araştırılması, *Yüksek Lisans Tezi*, K.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
20. **Temren, Z.,** 2009. İlık karışım asfalt uygulamaları ve performansı, *5.Ulusal Asfalt Sempozyumu*, Ankara, s. 50-60.
21. **Chowdhury, A. and Button, J.W.,** 2008. Review of warm mix asphalt in the US, *Texas Transportation Institute, Report, 473700-00080-1, Project, 473700-00080*, Southwest region University Transportation Center, Texas, USA.
22. **Maccarone, S., Holleran, G. and Ky, A.,** 1994. Cold asphalt systems as an alternative to hot mix, *Proceedings, 9th International AAPA Conference*, Surfers Paradise, Queensland, Australia. (<http://asphalt.csr.co.za/FArefs/>).
23. **Koenders, B.G., Stoker, D.A., Bowen, C., De Groot, P., Larsen, O., Hardy, D. and Wilms, K.P.,** 2000. Innovative processes in asphalt production and application to obtain lower operating temperatures, *2nd Eurasphalt & Eurobitume Congress*, Barcelona, Spain.
24. <http://www.sasolwax.com/Applications.html>.
25. **Walker, D.,** 2009. Emerging warm mix asphalt technologies, *Magazine of Asphalt Institute*, Lexington, KY.
26. **Corrigan, M.,** 2006. Warm mix asphalt technologies and research, Federal Highway Administration Office of Pavement Technology, Washington, D.C., USA, Accessed December. (<http://www.fhwa.dot.gov/pavement/asphalt/wma.cfm>)
27. **Hurley, G.C. and Prowell, B.D.,** 2005 Evaluation of Aspha-Min<sup>®</sup> zeolite for use in warm mix asphalt, *National Center for Asphalt Technology Report, NCAT 05-04 (2005a)*, Auburn, AL.

28. **Larsen, O.R., Moen, O., Robertus, C. and Koenders, B.G.,** 2004. WAM-Foam asphalt production at lower operating temperatures as an environmental friendly alternative to HMA, Proceedings, *3rd Eurasphalt & Eurobitume Congress*, Vienna.
29. **Romier, A., Audeon, M., Jac, D. and Martineau, Y.,** 2006. Low-Energy asphalt with performance of hot-mix asphalt, *National Academy of Sciences*, Washington, D.C., USA.
30. **Butz, T., Rahimian, I. and Hildebrand, G.,** 2001. Modifications of road bitumens with the Fischer- Tropsch paraffin Sasobit®, *Journal of Applied Asphalt Binder Technology*, October, pp. 70-86.
31. **Hurley, G.C. and Prowell, B.D.,** 2005. Evaluation of Sasobit® for use in warm mix asphalt, *National Center for Asphalt Technology Report, NCAT 05-06 (2005b)*, Auburn University, Auburn, Alabama.
32. Sasol International., 2005. What is Sasobit®? <http://www.sasolwax.com>, Accessed January 14.
33. **Prowell, B.D. and Hurley, G.C.,** 2007. Warm-Mix Asphalt: best practices quality improvement series, National Asphalt Pavement Association, December 2007b.
34. **Brown D.C.,** 2008. Warm Mix Asphalt: Proving its benefits, *Magazine of Asphalt Institute*, Lexington, KY 34
35. **Anderson, R.M., Baumgardner, G., May, R., and Reinke, G.,** 2008. Engineering properties, emissions, and field performance of warm mix asphalt Technologies, *Report, NCHRP 9-47*, TRB, National Highway Research Council, Washington, D.C., USA.
36. **Kristjansdottir, O.,** 2006. Warm mix asphalt for cold weather paving, A thesis for partial fulfillment of the degree of Master of Science in Civil Engineering, *Report No, WA-RD 650.1*, University of Washington, Seattle, Washington, USA.
37. **KÖK, B.V.,** 2007. Bitümlü sıcak karışımların üretiminde yeni bir karıştırma yönteminin araştırılması, *Doktora Tezi*, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
38. **GÜRER, C.,** 2005. “Atık mermer parçalarının yol kaplamasında değerlendirilmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon, 2005.
39. **Orhan, F.,** 2012. Bitümlü karışımlar laboratuvarı çalışmaları, Ar-Ge Dairesi Başkanlığı Üstyapı Geliştirme Şube Müdürlüğü, KGM, Ankara.
40. **Çetinkaya R.,** 2009. Taş mastik asfaltın Almanya’da kullanımı.



41. **Han, S., Graf, K. and Kohl, A.**, 2009. Taş mastik asfalt/uzun ömürlü yapılar, 5. *Asfalt Sempozyumu*, s. 40-49.
42. **Blazejowski, K.**, 2010. Stone Matrix Asphalt-Theory and Practice, CRC Press, Taylor & Francis Group, U.S.
43. **Yardım, M.S., ve Arslan, F.**, 2013. Türkiye’de taş mastik asfalt kaplama kullanımı ve literatür üzerine bir değerlendirme, 6. *Ulusal Asfalt Sempozyumu*, Ankara, 27-28 Kasım, s. 61-72.
44. **Öztürk, D.**, 2008. Türkiye’ de poroz asfaltın uygulanabilirliği, *Yüksek Lisans Tezi*, Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Samsun.
45. **Özay, O.**, 2011. Farklı modifiye katkılarıyla hazırlanan poroz asfalt karışımların performansının incelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
46. **Uluçaylı, M.**, 1976. Türkiye’de asfalt beton kaplamalar ve alternatifleri, Karayolları Teknik Bülteni.
47. **Tunç, A.**, 2004. Esnek Kaplama Malzemeleri El Kitabı, Asil Yayın Dağıtım, ISBN: 975-8784-20-X, Ankara.
48. **Karavaşin, M.**, 2007. Aşırı dingil yüklemesinin karayollarına verdiği zararlar, T.C. Ulaştırma Bakanlığı.
49. **Kuloğlu, N.**, 2001. Bitüm ve bitümlü sıcak karışımların rijitliğine etki eden parametreler, *TÜBİTAK, Türk Mühendislik ve Çevre Bilimleri Dergisi*, **25**, 61-67.
50. **Lav, A.H. ve Lav, M.A.**, 2004. Shell Bitüm El Kitabı, İSFALT Bilimsel Yayınları, No:3, 334 s., İstanbul.
51. **Bahia, H.U., Hanson, D.I., Zeng, M., Zhai, H., Khatri, M.A. and Anderson, R.M.**, 2001. Characterization of modified asphalt binders in superpave mix design, Transportation Research Board, National Research Council, **NCHRP Report 459**, Washington, D.C.
52. **MACİT, S.**, 2003. Reverber fırın cürufunun sıcak karışım asfalt betonunda kullanımı, *Yüksek Lisans Tezi*, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
53. **Kandhal,P.S., Lubold, C.W., Roberts, F.R.**, 1989. Water damage to asphalt overlays: case histories, *Annual Meeting of the Association of Asphalt Paving Technologists*, Nashville, Tennessee.
54. **Kutluhan, S., ve Agar, E.**, 2004. Bitümlü sıcak karışımlarda tekerlek izi oluşumunun incelenmesi, 4. *Ulusal Asfalt Sempozyumu*, Ankara, 25-26 Kasım, s. 213-223.

- 55. Zaniewski J.P. and Pumphrey M.E.** 2004. Evaluation of performance graded Asphalt binder equipment and testing protocol, Asphalt Technology Program, p. 107.
- 56. McGennis, R.B., Shuler, S. and Bahia, H.U.,** 1994. Background of superpave asphalt binder test methods, *Report No, FHWA-SA-94-069*, Asphalt Institute, Lexington, KY.
- 57. Reinke, G.,** 2003. Determination of mixing and compaction temperature of PG binders using a steady shear flow test, presentation made to the Superpave Binder Expert Task Group, [http://bridge.ecn.purdue.edu/spave/Technical%20Info/Meetings/Binder%20ETG%20Sept%202003%20Las%20Vegas,%20NV/Reinke\\_MIX%20AND%20COMPACTINO%20INFO%20FOR%20ETG%209-15-03.pdf](http://bridge.ecn.purdue.edu/spave/Technical%20Info/Meetings/Binder%20ETG%20Sept%202003%20Las%20Vegas,%20NV/Reinke_MIX%20AND%20COMPACTINO%20INFO%20FOR%20ETG%209-15-03.pdf).
- 58. West, R.C., Watson, D.E., Turner, P.A. and Casola, J.R.,** 2010. Mixing and compaction temperatures of asphalt binder in hot-mix asphalt, **NCHRP Report 648**, Transportation Research Board, Washington, D.C, USA.
- 59. Bahia, H.U. and Hanson, D.I.,** 2000. Superpave protocols for modified binders, *Draft Topical Report (Task 9)*, **NCHRP Project 9-10**, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C.
- 60. Yılmaz, M., ve Kök, B.V.,** 2008. Stiren-Butadien-Stiren modifiyeli bitümlü bağlayıcıların superpave sistemine göre yüksek sıcaklık performans seviyesinin ve işlenebilirliğinin belirlenmesi, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, **23(41)**, 811-819.
- 61. Zoorob, S.E. and Suparma, L.B.,** 2000. Laboratory sesign and investigation of the properties of continuously graded asphaltic concrete containing recycled plastics aggregate replacement (Plastiphalt), *Cement&Concrete Composites*, **22**, 233-242.
- 62. Hınıshoğlu,S.,** 1998, An investigation on the Marshall and resilient characteristics of asphalt concrete with bituminous binder modified with high density polyethylene, *Doktora Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- 63. Francken, L.,** 1998. Bituminous binders and mixes, Rilem Reports, E & FN Spon, 352 p. London and New York.
- 64. 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.

- 65. Harvey, J.T., Deacon, J.A., Tsai, B. and Monismith, C.L., 1995.** Fatigue performance of asphalt concrete mixes and its relationship to asphalt concrete pavement performance in California, California Department of Transportation, *Report No, RTA-65W485-2.*
- 66. Kaloush, K.E. and Witzak, M.W., 2002.** Tertiary flow characteristics of asphalt mixtures, *J Assoc Asphalt Paving Technol*, **71**, 278–306.

## **ÖZGEÇMİŞ**

1987 yılında Elazığ'da doğdum. İlk, orta ve lise öğrenimimi Elazığ'da tamamladım. 2008 yılında Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümünde Lisans eğitime başladım ve 2012 yılında bu fakülteden mezun oldum. 2012 yılında Elazığ Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Bölümü Ulaştırma Anabilim Dalında yüksek lisans eğitimime başladım. Halen aynı Anabilim Dalında yüksek lisans eğitimime devam etmekteyim.