

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



GRAFİT KATKISININ BİTÜM VE TAŞ MASTİK ASFALT
KAPLAMAYA ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

İnşaat Müh. Yunus ERKUŞ

Yüksek Lisans Tezi

İnşaat Mühendisliği Teknolojileri Programı Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Baha Vural KÖK

OCAK-2017

ÖNSÖZ

Yapmış olduğum tez çalışmasında tüm yoğunluğuna rağmen bilgisini, tecrübesini ve yardımını benden esirgemeyen değerli danışman hocam Doç. Dr. Baha Vural KÖK' e öncelikle gönülden teşekkür ederim.

Kendilerinden ders alarak yeni bilgiler edindiğim değerli hocalarım Prof. Dr. Necati KULOĞLU' na, Doç. Dr. Mehmet YILMAZ' a ve Doç. Dr. Taner ALATAŞ' a şükranlarımı sunarım.

Laboratuvar çalışmalarında yardımlarını benden esirgemeyen meslektaşım Arş. Gör. Mustafa AKPOLAT' a ve kardeşim Taha ERKUŞ' a son olarakta çalışmanın yapılmasında MF 16.37 numaralı proje ile maddi destek sağlayan FÜBAP birimine teşekkürü bir borç bilirim.

Yunus ERKUŞ

ELAZIĞ - 2017

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	II
İÇİNDEKİLER.....	III
ÖZET	V
SUMMARY	VI
ŞEKİLLER LİSTESİ	XII
TABLOLAR LİSTESİ	XII
SEMBOLLER LİSTESİ	XII
KISALTMALAR.....	XIII
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ÖZETİ.....	3
2.1. Bitümlü Bağlayıcılar	3
2.2. Bitümlü Bağlayıcılarda Yaşlanma Olayı.....	7
2.2.1. Bitümlerin Yaşlanma Nedenleri	8
2.3. Bitümlü Bağlayıcılarda Katkı Kullanımı	9
2.3.1. Bitümlü Bağlayıcıların Modifiye Edilme Sebepleri	12
2.3.2. Grafit Minerali	16
2.3.3. Modifiye Bitüm Üretiminde Grafitin Katkı Maddesi Olarak Kullanılması	14
2.3.4. Grafitin Kullanıldığı ve Yaşlanmayla İlgili Yapılan Çalışmalar	16
3. KARAYOLU YAPISI.....	41
3.1. Bitümlü Sıcak Karışımlar	43
3.2. Taş Mastik Asfalt Kaplamalar	46
3.2.1. Taş Mastik Asfalt Kaplamaların Teknik Özellikleri.....	48
3.2.2. Taş Mastik Asfalt Kaplamaların Uygulama Alanları	52
4. TEZ ÇALIŞMASINDA KULLANILAN DENEY YÖNTEMLERİ.....	54
4.1. Modifiye Bağlayıcıların Hazırlanması.....	54

4.2. Penetrasyon Deneyi (EN 1426).....	55
4.3. Yumuşama Noktası Deneyi (EN 1427).....	57
4.4. Dönel Viskozimetre (RV) Deneyi (ASTM D 4402)	60
4.5. Dinamik Kayma Reometresi (DSR) Deneyi (AASHTO TP5).....	65
4.5. Kiriş Eğilme Reometresi (BBR) Deneyi (AASHTO TP1)	69
4.6. Marshall Stabilite ve Akma Deneyi	70
4.7. İndirek Çekme Rijitlik Modülü Deneyi.....	72
4.8. İndirek Çekme Yorulma Deneyi	74
5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	78
5.1. Bağlayıcılar Üzerinde Uygulanan Deneyler ve Sonuçları	78
5.1.1. Penetrasyon Deney Sonuçları.....	81
5.1.2. Yumuşama Noktası Deney Sonuçları.....	82
5.1.3. Dönel Viskozimetre (RV) Deney Sonuçları	83
5.1.4 Dinamik Kayma Reometresi (DSR) Deney Sonuçları	85
5.1.5. Kiriş Eğilme Reometresi Deney Sonuçları	90
5.2. Bitümlü Sıcak Karışımlar Üzerinde Yapılan Deneyler	92
5.2.1. Optimum Bitüm Oranının Belirlenmesi.....	93
5.2.2. İndirek Çekme Rijitlik Modülü Deney Sonuçları.....	98
5.2.3. İndirek Çekme Tekrarlı Yorulma Deney Sonuçları	106
6. SONUÇ	114
KAYNAKLAR.....	115
ÖZGEÇMİŞ	119

ÖZET

Bitümlü sıcak karışımlar (BSK) içindeki bitüm, yol kaplama uygulamaları için elverişli mekanik ve reolojik özelliklere sahip viskoelastik bir malzemedir. Bununla birlikte, artan trafik hacimleri ve araç yükleri nedeniyle, bitümlü sıcak karışımların, bilhassa tekerlek izi gibi kalıcı deformasyonlara ve termal çatlamalara karşı direncinin geliştirilmeye ihtiyacı vardır. Kaplamanın termal iletkenliğini artırarak ısıyı daha kolay transfer edebilmesi için karışıma ya da bitüme siyah karbon, grafit, karbon lifleri gibi katkı maddeleri ilave edilmektedir. Bu çalışmada bitümlü karışımların termal özellikleri iyileştirmek için kullanılan grafitin; bitümün geleneksel ve reolojik özellikleri üzerindeki etkilerine ek olarak taş mastik asfalt karışımının mekanik özellikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bağlayıcı ağırlığınca dört farklı oranda grafit ile modifiye edilen bağlayıcılara yumuşama noktası, penetrasyon, dönel viskozimetre, dinamik kayma reometresi ve kiriş eğilme reometresi deneyleri uygulanmıştır. Daha sonra farklı oranlarda grafit içeren bağlayıcılardan elde edilen taş mastik asfalt karışım numuneleri etüvde farklı zaman aralıklarında yaşlandırılmıştır. Karışımlara Marshall stabilite ve akma, indirek çekme rijitlik modülü ve indirek çekme yorulma testleri uygulanmıştır. Sonuçta grafit ilavesinin bitümün penetrasyon değerini düşürüp yumuşama noktası değerlerini artırdığı, viskozite değerlerini artırarak karışımların karıştırma sıkıştırma sıcaklıklarının 8°C'ye kadar artmasına neden olduğu, buna karşın tekerlek izi parametresinin de yükselmesine neden olduğu tespit edilmiştir. Düşük sıcaklıkta grafit içeriğinin artışıyla deformasyon ve rijitlik değerleri önemli ölçüde değişirken rijitliği üzerinde tutma özelliğinde önemli bir değişiklik olmamıştır. Saf ve farklı grafit içeriğindeki orijinal ve yaşlandırılmış bitümlü sıcak karışım numunelerinin zamana bağlı şekil değiştirme davranışında belirgin bir farkın olmadığı, buna karşın yaşlandırma süresinin artması ile rijitlik değerlerinin ve yük tekrar sayısının arttığı belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Grafit, Bitüm, Reolojik özellikler, Taş mastik asfalt, Yaşlanma, Mekanik özellikler.

SUMMARY

Investigation of Effect to Bitumen and Stone Mastic Asphalt Pavement of Graphite

Bitumen in hot mix asphalt (HMA), is viscoelastic material having suitable mechanical and rheological characteristics for road paving applications. Moreover, hot mix asphalt need to be developed to resist particular permanent deformations like rutting and thermal cracking due to increased traffic volumes and vehicle loads. Additives such as carbon black, graphite, carbon fibers are added to mixture or bitumen in order to transfer heat by increasing thermal conductivity. In this study, the effect of graphite used for improving the thermal properties of bituminous mixtures on rheological and conventional properties of bitumen has been investigated. Penetration, softening point, rotational viscosity and dynamic shear rheometer tests were applied to binders modified by four different proportions of graphite by weight of bitumen. Stone mastic asphalt mixtures which were manufactured with pure and modified bitumen were aged in different time intervals in oven. They have been applied to Marshall stability and flow, indirect tensile stiffness modulus and indirect tensile fatigue tests. In conclusion, it was determined that penetration values decreased while softening point values increased with the increasing of graphite content. While the graphite induced 8°C increases in mixing-compacting temperature by increasing the viscosity values, on the other hand it caused an increase in rutting parameter. In low temperature, the deformation and stiffness values changed significantly with the increase of the graphite content, but the property hold on the stiffness of the bitumen did not change significantly. It has been determined that there is no significant difference in the time-dependent deformation behavior of the original and aged samples in pure and different graphite content despite the stiffness values and load repetition number of the samples increased with rise of the aging time.

Keywords: Graphite, Bitumen, Rheological properties, Stone mastic asphalt, Aging, Mechanical properties.

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Bitümlü bağlayıcıların gruplandırılması	5
Şekil 2.2. Petrolün damıtılması ve bitümün elde edilmesi	6
Şekil 2.3. Bitümün zaman içerisinde yaşlanması	8
Şekil 2.4. Bitümün statik yükler karşısındaki davranışı	10
Şekil 2.5. Bitümün dinamik yükler karşısındaki davranışı	11
Şekil 2.6. Grafit mineralinin katı ve toz hali	15
Şekil 2.7. Isı transfer modeli diyagramı	17
Şekil 2.8. Numunelerin farklı derinliklerdeki maksimum sıcaklıkları	17
Şekil 2.9. Numunelerin farklı derinliklerdeki tekerlek izi eğrileri	18
Şekil 2.10. Farklı grafit yüzdelerinde asfalt bağlayıcının depolama modülü.....	19
Şekil 2.11. Deney düzeneği ve grafit içeriğiyle boyuna direncin değişimi.....	21
Şekil 2.12. Grafit içeriğiyle donma-çözülme indeksi ve dinamik stabilitenin değişimi	22
Şekil 2.13. Asfalt bağlayıcının termal özellikleri ölçümünün şematik sunumu.....	24
Şekil 2.14. Grafit yüzdesi ve depolama stabilitesi arasındaki ilişki	24
Şekil 2.15. Yaşlanmış bitümlü bağlayıcıların yumuşama sıcaklıklarındaki değişim.....	25
Şekil 2.16. Yaşlanmış bitümlü bağlayıcıların penetrasyon değerlerindeki değişim	25
Şekil 2.17. Bitümlü bağlayıcıların kayma modülü ve faz açısının sıcaklıkla değişimi.....	26
Şekil 2.18. Grafit içeriğine bağlı olarak viskozite-sıcaklık ilişkisi	27
Şekil 2.19. Grafit içeriğine bağlı olarak aktivasyon enerjisi değişimi	27
Şekil 2.20. Grafit içeriğine bağlı olarak kompleks kayma modülü değişimi	28
Şekil 2.21. 58°C’de grafit içeriğine bağlı olarak $G^*/\sin\delta$ değerlerinin değişimi	28
Şekil 2.22. Grafit içeriğine bağlı olarak depolama modülünün değişimi.....	29
Şekil 2.23. Yaşlanma indeksi ve film kalınlığı arasındaki ilişki	31
Şekil 2.24. Yaşlanma ve hava boşluğu arasındaki ilişki	32
Şekil 2.25. Düşük hava boşluklu karışımların film kalınlığı ve esneklik modülü arasındaki ilişki	33
Şekil 2.26. Yüksek hava boşluklu karışımların film kalınlığı ve esneklik modülü arasındaki ilişki	33
Şekil 2.27. Ilık karışım katkısı ve indirek çekme mukavemeti arasındaki ilişki.....	34
Şekil 2.28. Ilık karışım katkısı ve yaşlanma indeksi arasındaki ilişki.....	35

Şekil 2.29. Trinidad göl asfaltı içeriğiyle RP değerlerinin değişimi	36
Şekil 2.30. Trinidad göl asfaltı içeriğiyle RTFOT, PAV ve UV yaşlandırmada yumuşama noktası indeksi	37
Şekil 2.31. Trinidad göl asfaltı içeriğiyle RTFOT, PAV ve UV yaşlandırmada viskozite yaşlanma indeksi.....	38
Şekil 2.32. Saha yaşlanmasında hava boşluğu değişimi	39
Şekil 2.33. Laboratuvar yaşlanmasında hava boşluğu değişimi.....	40
Şekil 3.1. Rijit ve esnek üst yapılarda yük dağılımı	42
Şekil 3.2. Tipik bir yol üstyapı kesiti ve gerilme dağılımı	43
Şekil 3.3. Asfalt betonu, taş mastik asfalt ve poroz asfaltın yapısal farkları.....	46
Şekil 3.4. Taş mastik asfalt kaplama kesiti	48
Şekil 3.5. Çeşitli sıcak karışımların gradasyon eğrisi	51
Şekil 4.1. Karıştırma mili ve etkileri.	54
Şekil 4.2. Modifiye bitüm karıştırma cihazı.....	55
Şekil 4.3. Penetrasyon deney aleti.....	56
Şekil 4.4. Yumuşama noktası halka ve bilye boyutları	58
Şekil 4.5. Yumuşama noktası deney düzeneği	58
Şekil 4.6. Yumuşama noktası deneyinin öncesi ve bilyelerin düşmesi ile deneyin bitişi ...	59
Şekil 4.7. Dönel viskozimetre (RV) deney şeması.....	61
Şekil 4.8. Asfalt bağlayıcı için tipik viskozite eğrisi.....	62
Şekil 4.9. Brookfield viskozimetresi ve termosel sistem	62
Şekil 4.10. Viskozimetre ve mil bağlantısı.....	64
Şekil 4.11. Dönel viskozimetre (RV) göstergesi.....	64
Şekil 4.12. Dinamik kayma reometresi (DSR) çalışma şekli	66
Şekil 4.13. DSR test cihazı	66
Şekil 4.14. Viskoelastik davranış	67
Şekil 4.15. BBR test cihazı.....	69
Şekil 4.16. Sünme oranının belirlenmesi.....	70
Şekil 4.17. Marshall stabilite ve akma aleti.....	71
Şekil 4.18. UMATTA cihazı ve ITSM deney düzeneği	73
Şekil 4.19. Yorulma deney düzeneği.....	75

Şekil 4.20. Temsili deformasyon – yük tekerrür sayısı ilişkisi	76
Şekil 5.1. Grafitin x1000 SEM görüntüleri	80
Şekil 5.2. Grafitin x10000 SEM görüntüleri	80
Şekil 5.3. Grafit içeriği- penetrasyon ilişkisi.....	81
Şekil 5.4. Grafit içeriği- yumuşama noktası ilişkisi.....	82
Şekil 5.5. Grafit içeriği ve penetrasyon indeksi arasındaki ilişki.....	83
Şekil 5.6. 135°C ve 165°C’de viskozitelerdeki değişim.....	84
Şekil 5.7. Karıştırma-sıkıştırma sıcaklıklarındaki değişim.....	85
Şekil 5.8. 52°C’de $G^*/\sin\delta$ değerleri.....	86
Şekil 5.9. 58°C’de $G^*/\sin\delta$ değerleri.....	87
Şekil 5.10. 64°C’de $G^*/\sin\delta$ değerleri.....	87
Şekil 5.11. 70°C’de $G^*/\sin\delta$ değerleri.....	88
Şekil 5.12. Farklı sıcaklıklarda $G^*/\sin\delta$ – grafit içeriği ilişkisi.....	88
Şekil 5.13. $G^*/\sin\delta$ değerlerinin sıcaklığa bağlı olarak değişimi.....	89
Şekil 5.14. Farklı sıcaklıklarda grafit içeriği-faz açısı ilişkisi.....	90
Şekil 5.15. Grafit içeriğiyle rijitlikte ve deformasyonda meydana gelen değişim.....	91
Şekil 5.16. St/m-değeri değerlerinin grafit içeriği ile değişimi.....	92
Şekil 5.17. Bitüm içeriği- V_h ilişkisi.....	95
Şekil 5.18. Bitüm içeriği- V_{fa} ilişkisi.....	95
Şekil 5.19. Bitüm içeriği- G_{mb} ilişkisi.....	95
Şekil 5.20. Bitüm içeriği- V_{MA} ilişkisi.....	96
Şekil 5.21. Bitüm içeriği- stabilite ilişkisi.....	96
Şekil 5.22. Bitüm içeriği- akma ilişkisi.....	96
Şekil 5.23. Katkısız numunelerin zamana bağlı şekil değiştirme eğilimi	99
Şekil 5.24. %10 grafit katkılı numunelerin zamana bağlı şekil değiştirme eğilimi	99
Şekil 5.25. %15 grafit katkılı numunelerin zamana bağlı şekil değiştirme eğilimi	100
Şekil 5.26. %20 grafit katkılı numunelerin zamana bağlı şekil değiştirme eğilimi	100
Şekil 5.27. Katkısız numunelerin gerilme-şekil değiştirme grafiği.....	101
Şekil 5.28. %10 grafit katkılı numunelerin gerilme-şekil değiştirme grafiği.....	102
Şekil 5.29. %15 grafit katkılı numunelerin gerilme-şekil değiştirme grafiği.....	102
Şekil 5.30. %20 grafit katkılı numunelerin gerilme-şekil değiştirme grafiği.....	103

Şekil 5.31. Yaşlandırılmamış numunelerin gerilme-şekil değiştirme grafiği	104
Şekil 5.32. 1 hafta yaşlandırılmış numunelerin gerilme-şekil değiştirme grafiği	104
Şekil 5.33. 2 hafta yaşlandırılmış numunelerin gerilme-şekil değiştirme grafiği	105
Şekil 5.34. 3 hafta yaşlandırılmış numunelerin gerilme-şekil değiştirme grafiği	105
Şekil 5.35. Saf karışımların farklı yaşlanma sürelerindeki deformasyon eğilimi.	106
Şekil 5.36. %10 grafit katkılı karışımların farklı yaşlanma sürelerindeki deformasyon eğilimi.....	107
Şekil 5.37. %15 grafit katkılı karışımların farklı yaşlanma sürelerindeki deformasyon eğilimi.....	107
Şekil 5.38. %20 grafit katkılı karışımların farklı yaşlanma sürelerindeki deformasyon eğilimi.....	108
Şekil 5.39. Yaşlandırma zamanına göre yük tekrar sayılarındaki değişim	109
Şekil 5.40. Yaşlandırılmamış farklı grafit içeriğindeki karışımların deformasyon eğilimi.	110
Şekil 5.41. 1 hafta yaşlandırılmış farklı grafit içeriğindeki karışımların deformasyon eğilimi.....	111
Şekil 5.42. 2 hafta yaşlandırılmış farklı grafit içeriğindeki karışımların deformasyon eğilimi.....	111
Şekil 5.43. 3 hafta yaşlandırılmış farklı grafit içeriğindeki karışımların deformasyon eğilimi.....	112
Şekil 5.44. Grafit içeriğine göre yük tekrar sayılarındaki değişim.	113

TABLÖLER LİSTESİ

Tablo 2.1. Farklı fller bileşenlerinde asfalt karışımın test sonuçları	19
Tablo 2.2. Kaplama tipine göre grafit oranı ile elektrik direnci değişimi.....	20
Tablo 2.3. Farklı grafit oranlarında CACS'ın performans özellikleri	21
Tablo 2.4. Grafit modifiyeli asfalt bağlayıcının bileşenleri.....	23
Tablo 2.5. Grafit oranı ile yumuşama noktası sıcaklığının değişimi	30
Tablo 2.6. Grafit oranı ile tekerlek izi parametrelerinin değişimi	30
Tablo 2.7. Grafit oranı ile elektriksel iletkenliğin değişimi.....	31
Tablo 3.1. TMA'da kullanılacak kaba agrega özellikleri.	49
Tablo 3.2. İnce agrega özellikleri.	50
Tablo 3.3. TMA aşınma ve binder için gradasyonu ve tolerans sınırları.....	51
Tablo 3.4. TMA tasarım kriterleri.....	52
Tablo 4.1. Penetrasyon değerleri arasında olabilecek en büyük farklar	57
Tablo 4.2. Hedeflenen kayma gerilmesi ve deformasyon değerleri	68
Tablo 5.1. Saf bağlayıcının özellikleri.....	79
Tablo 5.2. Grafitin elementel analizi	79
Tablo 5.3. Bağlayıcıların karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları.	84
Tablo 5.4. DSR deney sonuçları.	85
Tablo 5.5. BBR deney sonuçları.....	90
Tablo 5.6. Agreganın fiziksel özellikleri.	93
Tablo 5.7. Agrega gradasyonu.	93
Tablo 5.8. Marshall tasarım deney sonuçları.....	94
Tablo 5.9. %6,5 bitüm içeriğindeki özellikler	97
Tablo 5.10. Bütün numune tiplerinin %6,5 bitüm içeriğindeki hacimsel ve mekanik özellikleri.....	98
Tablo 5.11. Yorulma deney sonuçları.....	109
Tablo 5.12. Yaşlanmış numunelerin yük tekrar sayılarının yaşlandırılmamışlara oranı. .	110

SEMBOLLER LİSTESİ

G*	: Kompleks kayma modülü
δ	: Faz açısı
H	: Numune yüksekliği
F	: İndirekt çekme rijitlik modülü deneyinde maksimum dikey yük
R	: Poisson oranı
E	: Şekil değiştirme
S_(t)	: Sünme rijitliği
m-değeri	: Sünme oranı
c	: Düzeltme katsayısı
S_m	: Rijitlik modülü
σ	: Gerilme
Wa	: Agreg ağırlığınca bitüm yüzdesi
Vh	: Hava boşluğu hacmi
Gmb	: Sıkıştırılmış karışımın hacim özgül ağırlığı
V_{MA}	: Agregalar arasındaki boşluk hacmi
Vfa	: Asfaltla dolu mineral agregadaki boşluk yüzdesi
n_a	: Yaşlanmış bitümün viskozite değeri
n_o	: Saf bitümün viskozite değeri

KISALTMALAR

BBR	: Bending Beam Rheometer (Kiriş Eğme Reometresi)
BSK	: Bitümlü Sıcak Karışım
CAB	: Kontrol Asfalt Bağlayıcı
CACB	: Bazalt Agregalı Asfalt Karışım
CACS	: Çelik Cürufu Agregalı Asfalt Karışım
CBR	: California Bearing Ratio (Kaliforniya Taşıma Oranı)
CS	: Kontrol Asfalt Numunesi
DSR	: Dynamic Shear Rheometer (Dinamik Kayma Reometresi)
FT	: Parafin Mumu
G-BHIS	: Grafitli Asfalt Karışım Numunesi
GMAB-10	: %10 Grafitli Modifiye Asfalt Bağlayıcı
GMAB-20	: %20 Grafitli Modifiye Asfalt Bağlayıcı
GMAB-30	: %30 Grafitli Modifiye Asfalt Bağlayıcı
GMAB-40	: %40 Grafitli Modifiye Asfalt Bağlayıcı
HAP	: Hidronik Asfalt Kaplaması
HMA	: Hot Mix Asphalt (Sıcak Karışım Asfalt)
İÇYD	: İndirekt Çekme Yorulma Deneyi
İKA	: Ilık Karışım Asfaltı
ITSM	: Indirect Tensile Stiffness Modulus (İndirek Çekme Rijitlik Modülü)
KGM	: Karayolları Genel Müdürlüğü
PAV	: Basınçlı Yaşlandırma Kabı
PI	: Penetrasyon İndeksi
RP	: Kazanılan Penetrasyon
RTFOT	: İnce Film Halinde Isıtma Testi
RV	: Rotational Viscometer (Dönel Vizkozimetre)
SB-BHIS	: Çelik Çubuklu ve Grafitli Asfalt Karışım Numunesi
SBS	: Stiren-Bütadien-Stiren
TMA	: Taş Mastik Asfalt
TÜPRAŞ	: Türkiye Petrol Rafinerileri Anonim Şirketi
UMATTA	: Universal Material Testing Apparatus(Üniversal Malzeme Deney Aleti)

1.GİRİŞ

Dünyada ve ülkemizde ulaşımın büyük bir çoğunluğu karayolları ile yapılmakta ve ağır taşıt trafiği gün geçtikçe artarak yollarımızı erken ve yapısal olarak tahrip etmektedir. Ağır taşıt trafiğinin ve aşırı yük tekrarının yanı sıra çevresel faktörler de başlı başına yollarda önemli bozulmaların oluşmasına neden olmaktadır.

Karayolu üstyapısında yaygın olarak bitümlü sıcak karışımlar (BSK) kullanılmaktadır. Bu karışımlar içindeki bitüm, yol kaplama uygulamaları için elverişli mekanik ve reolojik özelliklere sahip viskoelastik bir malzemedir (Akmal ve Usmani, 1999). Bununla birlikte, artan trafik hacimleri ve araç yükleri nedeniyle, bitümlü sıcak karışımların, bilhassa tekerlek izi gibi kalıcı deformasyonlara ve termal çatlamalara karşı direncinin geliştirilmeye ihtiyacı vardır. Bu amaçla, bitümün mekanik özelliklerini geliştirmek üzere çeşitli katkıların kullanımı, uzun zaman boyunca başarılı biçimde gerçekleştirilmiştir (Adedeji vd., 1996; Lu ve Isacson, 2001). Kullanılan bu katkıların modifikasyon işlemi genel olarak bitüme katılmasıyla modifiye bitüm üretilmesi veya asfalt plantinde doğrudan doğruya karışıma katılmasıyla modifiye karışım üretilmesi şeklinde elde edilebilmektedir. Günümüzde yaygın olarak kullanılan katılardan biri stiren-butadien-stiren (SBS) blok kopolimerleridir. Polimer türü malzemelerin elastomer sınıfı içerisinde bulunan SBS blok kopolimerleri, bitümlü bağlayıcıların elastikiyetini arttırmaktadır. Daha önce yapılan çalışmalar neticesinde SBS'nin yüksek sıcaklık koşullarında karışımların tekerlek izi oluşumu ve yorulmaya karşı dayanımlarını geliştirdiği ortaya çıkmıştır. Yaygın olarak kullanılan diğer bir katkı ise öğütülmüş araç lastikleridir. İçerisinde bulundurdıkları kauçuk nedeniyle öğütülmüş araç lastikleri de bitümlü karışımlara esneklik kazandırarak yorulma ömürlerini önemli derecede artırmaktadırlar. Kullanılan bu tip katkı maddeleri bitümlü karışımların yük altındaki deformasyon direncini artırmada başarılı olmakta ancak termal özellikleri üzerinde çok etkili olamamaktadırlar.

Yüksek ısı kapasiteleri nedeniyle bitümlü karışımlar güneş altında ısının absorbe edilmesine neden olabilmektedirler. Kaplamanın artan sıcaklığı da kalıcı deformasyonlara karşı direnç bakımından olumsuz sonuçlar doğurmaktadır. Kaplamanın termal iletkenliğini artırarak ısıyı daha kolay transfer edebilmesi için karışıma ya da bitüme siyah karbon, grafit ve karbon lifleri gibi katkı maddeleri ilave edilmektedir. Yapılan birçok çalışmada

bitüm modifikasyonunda grafit katkısının kullanımının bitümlü sıcak karışımların kalıcı deformasyona (Liu ve Wu, 2011), tekerlek izine (Xiaoming vd., 2007) ve yaşlanmaya (Pan vd., 2014) karşı dayanımlarını arttırdığı belirlenmiştir.

Bu tez çalışmasında bitüm ağırlığınca %7, %10, %13 ve %16 grafit kullanılarak modifiye bitümler hazırlanmıştır. Modifiye bitümlerin geleneksel ve reolojik özellikleri belirlenmiştir. Saf ve modifiye bitümlerle hazırlanan ve etüvde farklı zaman aralıklarında yaşlandırılan asfalt karışımlara; Marshall stabilite ve akma, rijitlik modülü ve yorulma deneyleri uygulanarak yaşlanma ile birlikte değerlendirilmiştir. Böylece farklı grafit oranlarında hazırlanan modifiye bitümler ve modifiye bitümle elde edilen sıcak karışımlar kendi arasında kıyaslama yapılarak en etkin grafit oranı belirlenmeye çalışılmıştır.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

2.1. Bitümlü Bağlayıcılar

Bitüm, siyah yada koyu kahverengi tonunda, çok güçlü yapışma özelliği olan, karbondisülfürde (C_2S) çözünebilen, asıl olarak hidrokarbonlar ve bunların türevlerinden oluşan bir yapı malzemesidir. Bitüm, yapısında çoğunlukla bulunan hidrokarbon molekülleriyle kısıtlı miktarda bulunan sülfür, nitrojen ve oksijen atomlarından meydana gelen kompleks bir kimyasal karışımdır (Romberg vd., 1959). Bitümün kimyasal içeriği aşırı derecede karmaşık olduğundan malzemenin detaylı bir kimyasal analizi çok karmaşık incelemeler gerektirmekte ve neticede reolojik özelliklerle korelasyonu üstesinden gelinmez bir duruma getirecek derecede aşırı veri meydana çıkmaktadır. Ancak bitümü asfaltenler ve maltenler olarak isimlendirilen iki büyük kimyasal sınıfa ayırmak mümkündür. Maltenler kendi aralarında reçineler, aromatikler ve doymunlar olarak alt sınıflara ayrılırlar (Whiteoak, 2004).

Asfaltenler: Karbon ve hidrojenden meydana gelen ve bir miktar nitrojen, sülfür ve oksijen barındıran, siyah yada kahverengi amorf katılardır. Asfaltenler bütün olarak bakıldığında, fazla molekül ağırlığına sahip, polar (elektriksel yüke sahip) ve kompleks aromatik maddelerdir. Asfalten miktarı bitümün reolojik özellikleri dikkate alındığında çok önemli etkilere sahiptir. Asfalten içeriğinin artırılmasıyla daha yüksek yumuşama noktasına sahip ve daha düşük penetrasyon değeri olan, daha sert ve sonuç olarak daha yüksek viskoziteli bir bitüm meydana gelmektedir. Asfaltenler, bitüm içeriğinin yaklaşık olarak %5~25'ini meydana getirmektedir.

Reçineler: Reçineler, asfaltenlerde olduğu gibi çoğunlukla hidrojen ve karbondan meydana gelmekte ve düşük miktarda oksijen, sülfür ve nitrojen bulundurmaktadır. Koyu kahverengi renkte, katı ya da yarı katı halde bulunan reçineler elektriksel olarak yüklüdür. Reçinelerin bu özellikleri onları kuvvetli bir yapışkan haline getirmektedir.

Aromatikler: Bitüm içerisindeki en düşük moleküler ağırlıklı naftenik bileşenlerden oluşan aromatikler, bitüm içerisinde dağılmış asfaltenlerin dağılması için gerekli olan ortamın büyük bir kısmını oluştururlar. Aromatikler, bitüm içeriğinin yaklaşık olarak %40~65'ini oluşturan koyu kahverengi, viskoz sıvılardır.

Doygunlar: Doygunlar, saman yada beyaz renkteki polar olmayan viskoz yağlardır. Doygunlar bitüm içeriğinin yaklaşık olarak %5~20'sini oluşturmaktadır.

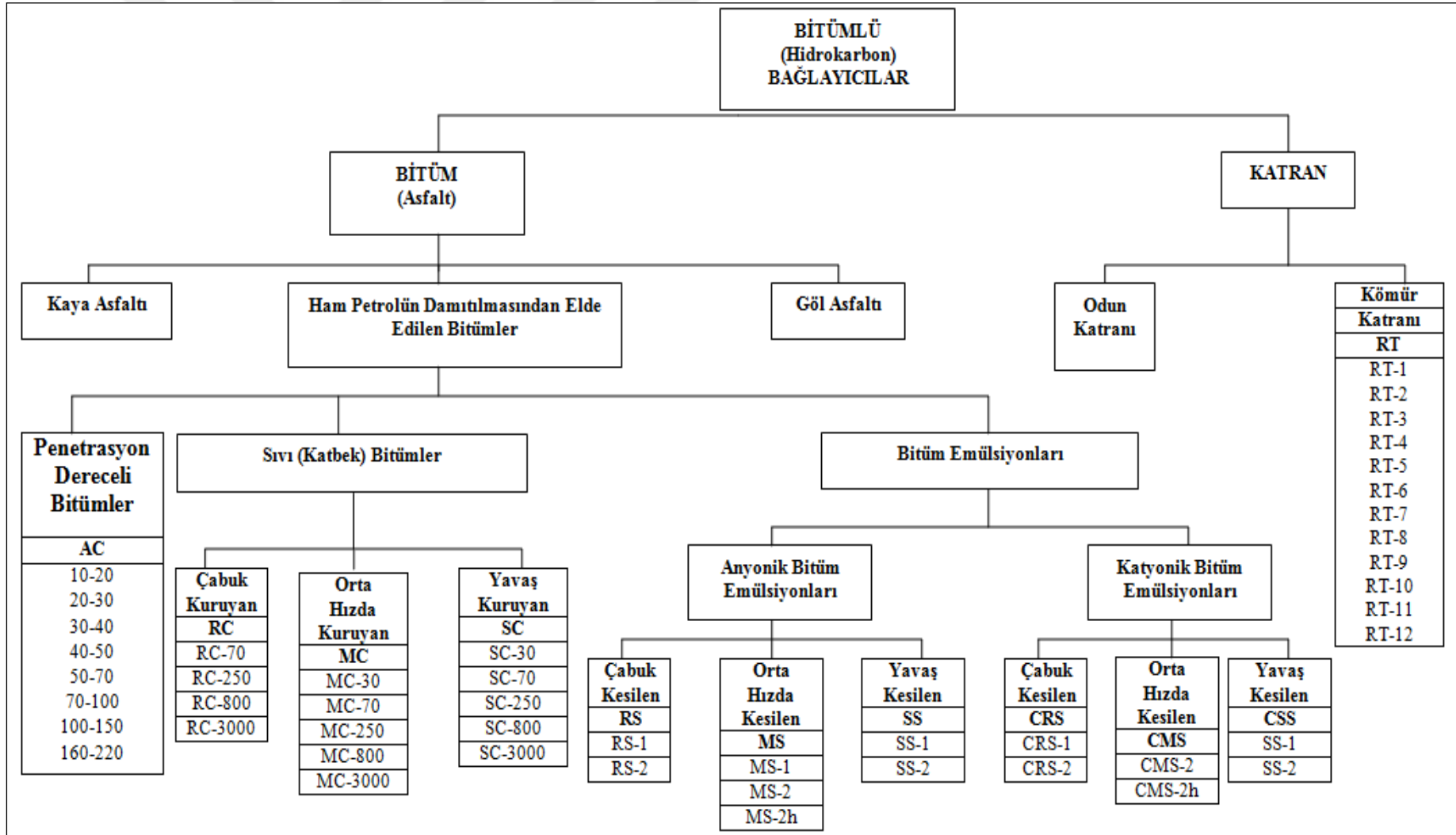
Bitümü meydana getiren asfaltenlerin, doyguların, reçinelerin ve aromatiklerin farklı oranlardaki sistematik karışımı, bitümün reolojisi üzerinde çok önemli etkilere sahiptir. Reoloji, malzemelerin sıcaklık ve yüklemenin etkisiyle zaman faktöründe dikkate alınarak davranışının değerlendirilmesidir. Asfalten miktarını dengede tutarak, diğerlerinin miktarı değiştirildiğinde (Ilıcalı, 2001);

- Denge durumundaki bir doygun ve reçine oranında aromatik miktarı artırıldığı zaman kayma mukavemetindeki küçük bir miktardaki azalmadan başka bir etki meydana gelmez.
- Reçine ve aromatiğin miktarı dengede tutulup doyguların miktarı artırıldığında bitüm yumuşar.
- Doygun ve aromatiğin miktarı dengede tutulup reçine miktarı artırıldığında bitüm sertleşir, penetrasyon indeksi azalır fakat viskozite artar.

Bitüm katı, yarı katı veya sıvı halde ham madde olarak doğadan elde edilebildiği gibi ham petrolün damıtılmasından da elde edilebilen mükemmel bir bağlayıcı türüdür. Bitüm özetle, bitümlü karışımların üretilmesinde kullanılmak üzere kıvamlılık ve kalitesi dikkate alınarak özel olarak hazırlanmış olan yumuşatılmış veya yumuşatılmamış bir bağlayıcı türü olarak da tanımlanabilir. Bitümlü bağlayıcılardan uygulamalarda elverişli bir şekilde faydalanmak için mutlaka sıvılaştırmak gerekir. Sıvılaştıran bağlayıcı karışımındaki agregaları kaplar ve sertleşerek bağlayıcılık vazifesini tamamlamış olur (Çelik, 2006). Yol üstyapısında kullanılan bitümlü bağlayıcıların sınıflandırılması Şekil 2.1'de verilmiştir.

Kaya bitümü yapısında çok fazla gözenek bulunan kalkerin ve daha nadir olarak da kum taşının doğal yollarla bitüm emmesinden meydana gelir. Mineral madde oranı genellikle malzemenin %90'ını oluştururken bitüm oranı da %10 kadardır. Ülkemizde bulunan kaya bitümleri daha çok kum taşı, kalker, kil gibi mineral maddeler ile %2~12 civarında bitümün karışımından meydana gelmektedir.

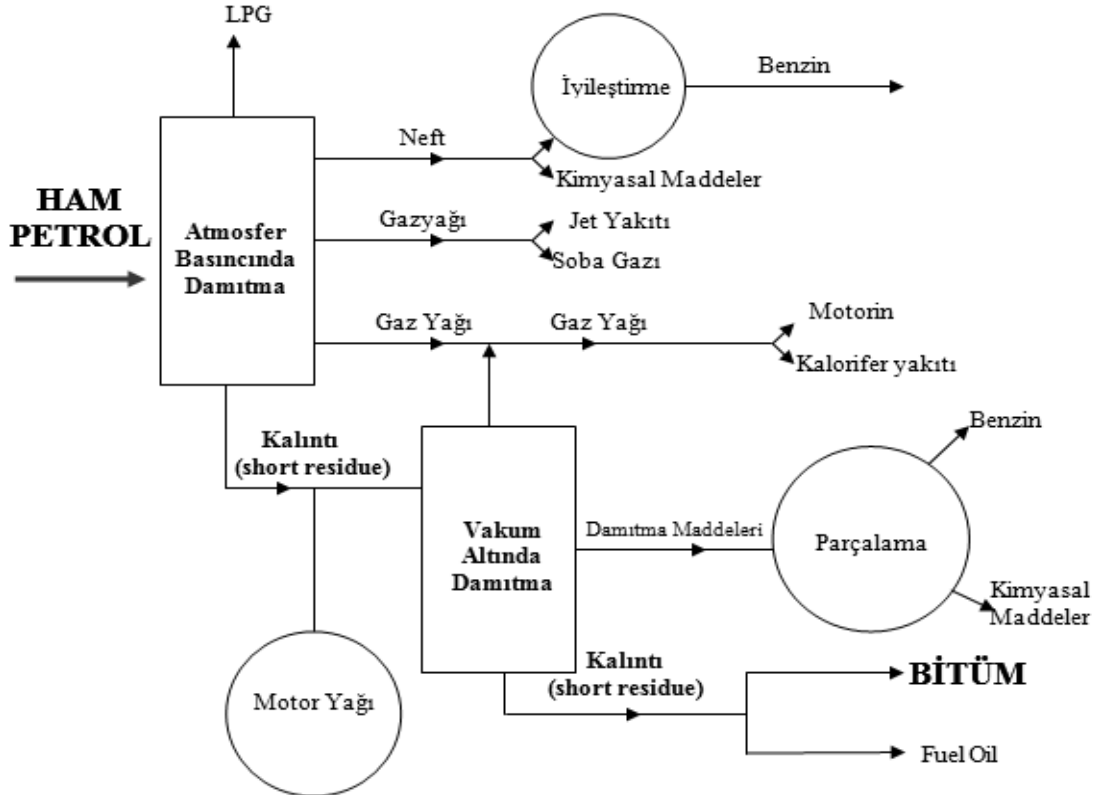
Göl bitümünde ise mineral malzeme çok ince taneler halinde bitüm ortamı içinde yayılmış durumdadır. Burada elde edilen bitüm içinde %35 kadar mineral malzeme mevcuttur.



Şekil 2.1. Bitümlü bağlayıcıların gruplandırılması

Petrol bitümü olarak adlandırılan bağlayıcılar ham petrolün işlenmesi ile elde edilirler. Ham petrol yatakları gerek fiziki şekil, gerekse kimyasal yapı bakımından birbirinden çok farklı özelliklere sahiptir. Ham petrolün içerisinde bulunan bitüm, bölgelere, arazi cinsine ve bulunduğu yatakların sınıfına göre değişik olarak ortaya çıkmaktadır. Uygulamalarda asfalt karışım yapılırken genellikle rafineri edilmiş bitümlü bağlayıcı kullanılır.

Ham petrolden bitüm elde edilme işlemi genel olarak ortak özellik gösterir. Petrol kuyularından temin edilen ham petrol rafineriye gelir ve pompalarla tanklara boşaltılır. Oradan ısıtma kolonlarına sevk edilerek sıcaklığı yükseltilen ham petrol damıtma kolonlarına gelir. Uçucu olan kısımlar bu kolonların üst kısmından çıkar ve soğutucularda yoğunlaşarak ayrılır. Bu damıtma işleminde kimyasal bir değişme oluşmaz. Sadece farklı sıcaklıklardaki bileşenler buharlaşarak petrolden ayrılırlar. Şekil 2.2’de ham petrolün işlenerek bitümlü bağlayıcının elde edilişi görülmektedir. Bu olay, damıtma işlemindeki koşullara yani sıcaklık seviyesine, basıncın derecesine ve su buharı miktarına bağlı olarak değişir. Bu koşulların değişimiyle birlikte geride kalan bitümün özellikleride değişir.



Şekil 2.2. Petrolün damıtılması ve bitümün elde edilmesi (Lav, 2007)

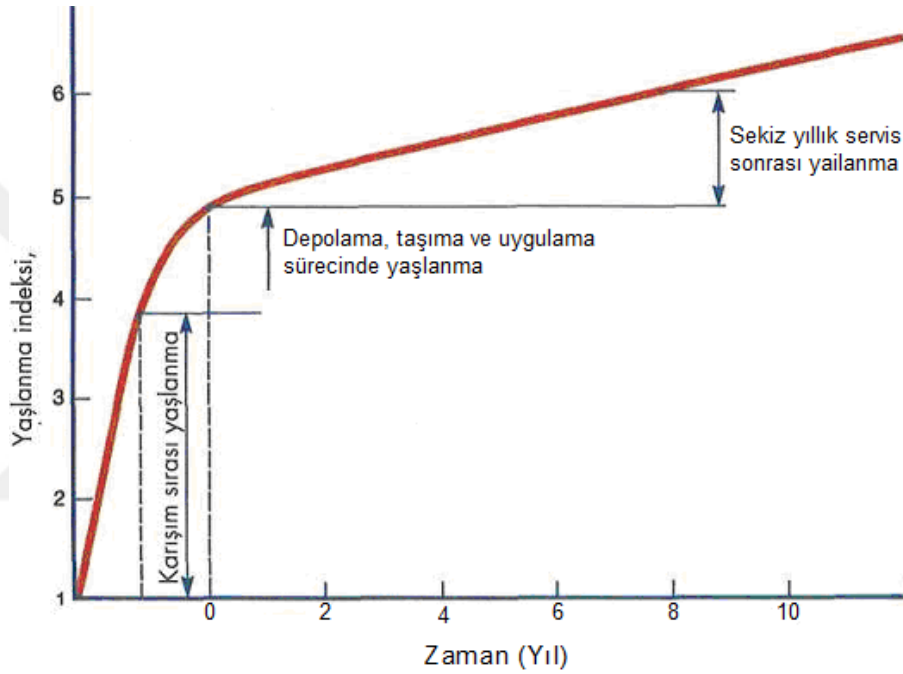
2.2. Bitümlü Bağlayıcılarda Yaşlanma Olayı

Bitümlü sıcak karışımların stabilitesinden ve içsel sürtünme direncinden agrega sorumluyken kohezyonu ise bitüm aracılığıyla sağlanmaktadır. Buna ek olarak bitüm agrega danelerini birbirine kenetleyerek trafik yükleri altında dağılmasını önlemekte, oluşturdukları düzgün yüzeyler aracılığıyla konforlu bir sürüş sağlamakta, kohezyon ve stabilitenin gelişmesini sağlamakta, karışımda agregalar arasındaki boşluklarını doldurarak geçirimsiz bir tabaka oluşmasını sağlamaktadır. Bağlayıcı olarak bitüm içeren karışımlarda, bitüm ağırlıkça maksimum % 5-7 ve hacimce maksimum % 13-15 gibi düşük oranlarda kullanılsa da esnek kaplamalarda çok önemli bir yer tutmaktadır (Tunç, 2004).

Bitümlü karışımların servis ömrü boyunca devamlı maruz kaldığı trafik hacmindeki ve dingil yüklerindeki sürekli devam eden artışlar, üretim sırasındaki yanlışlıklar ve iklim koşulları, yollarda tekerlek izi oluşumu, düşük sıcaklık çatlakları ve yorulma çatlakları gibi bozulmalara sebep olmakta, bu durum neticesinde yolun tahmin edilen ömür ve konfor standardını düşürmektedir. Bitümlü bağlayıcının hizmet performansını doğrudan etkileyen en önemli özelliği dayanıklılığıdır. Bitümlü bağlayıcılarda durabilite yada dayanıklılık bağlayıcının sertleşmeye karşı gösterdiği direnç olarak tanımlanmaktadır. Bitümlü bağlayıcının birçok nedenden dolayı sertleşmesi ve kırılgan hale gelmesine de “yaşlanma” yada “zamana bağlı yaşlanma” denilmektedir (Bell vd., 1992). Yapılan detaylı incelemeler yaşlanmanın iki kademe meydana geldiğini göstermektedir. Sıcak karışımın üretim tesisinde bitüm, sıcak agregaya katılır ve karışım belirli bir süre yüksek sıcaklıkta kalır. Bu aşamada agrega çevresinde bir film şeridi meydana getiren bitümde çok hızlı bir oksidasyon reaksiyonu meydana gelir. Taşıma ve uygulama esnasında da karışım sıcaklığa maruz kalmaktadır. Bu durumlar “kısa dönem yaşlanma” olarak tanımlanır. Oksidasyon sertleşmesi, su ve hava faktörleriyle birlikte üstyapının hizmet ömrü boyunca devam eder buda “uzun dönem yaşlanma” olarak tanımlanır (Öztürk ve Çubuk, 2004).

Kaplamaların yapımında en önemli yeri teşkil eden bitüm, üretiminden kaplama bileşeni olarak yol üzerinde hizmete başlayıncaya kadar uygulanan işlemlerde ciddi derecede oksidasyona maruz kalmaktadır. Bağlayıcının maruz kaldığı bu olumsuz koşullar onun performansını, reolojik davranışını ve dayanıklılığını önemli ölçüde etkilemektedir. Şekil 2.3’de bitümün yıllara bağlı olarak yaşlanma indeksi değerleri görülmektedir. Kısa

dönem yaşlanma sürecinde oksidasyonun yaklaşık %70'inin oluştuğu; uzun dönem yaşlanma sürecinde de oksidasyonun yavaşlayarak 8 yıl süre zarfında %30 civarında meydana geldiği görülmektedir. Şekilden de çıkarılabileceği gibi hızlı yaşlanma karışımın hazırlanması, serilmesi ve sıkıştırılması esnasında oluşmakta, bu süreç yolda düşük sıcaklıklarda yavaşlamaktadır.



Şekil 2.3. Bitümün zaman içerisinde yaşlanması

2.2.1. Bitümlerin Yaşlanma Nedenleri

Oksidasyon: Bitümün zaman içinde hidrokarbon yapısındaki karbonların oksijenle birleşerek oksitlenmesi neticesinde bitümün moleküler ağırlığının yükselmesine sebep olarak bitümün viskozluğu ve katılığının yükselmesidir.

Uçucu madde kaybı: Bitümün yapısında çok azda olsa bulunan uçucu maddelerin zamanla ve/veya ısıyla ayrılması sonucu bitümün sertleşmesine neden olmaktadır.

Tiksotropi: Bitüm, düşük sıcaklıklarda sabit bir şekilde bekletildiğinde bir rijitlik kazanmaktadır fakat bu rijitliğin nedeni bağlayıcının içindeki uçucu maddelerin buharlaşması veya sıcaklığın değişmesi olmayıp, bitümün kolloidal yapıdan meydana gelmesidir. Kolloidal yapının etkisiyle bitüm belirli bir durgunluktan sonra, soğukta, sünger şekline benzeyen, ağ biçiminde üç ekseninde gerilmiş ancak elektronik mikroskopla gözlemlenebilecek bir yapı kazanmaktadır. Bu yapı zaman içerisinde güçlenerek, bitüme, dış güçler karşısında, elastik malzemelerinkine benzeyen bir rijitlik kazandırmakta, bu rijitlik mekanik bir sarsıntı neticesinde ortadan kalkmaktadır. Tekrar aynı rijitliğin sağlanması için bitümü bir süre bekletmek gerekmektedir.

Sıcaklığın artışı da bitümün tiksotropiye dayalı rijitliği üzerinde mekanik bir sarsıntıya benzeyen etkiler meydana getirmektedir. Çünkü sıcaklık artışıyla bitümün misellerden meydana gelen rijitlik dokusu bozulmakta dahası miseller birbirinden kopmaya başlamakta bunun neticesinde ise bitüm rijitliğini kaybetmektedir.

Tiksotropi, kolloidal eriyiğin termik ve mekanik etkilerle rijitliğini kaybetmesi ve diğer fiziki şartlarının değişmemesi şartıyla belirli bir durgunluk süresi neticesinde rijitliğini tekrar kazanmasıdır.

Polimerleşme: Bitümün hidrokarbon yapısının süreç içerisinde başkalaşıma uğrayarak sertleşmesidir.

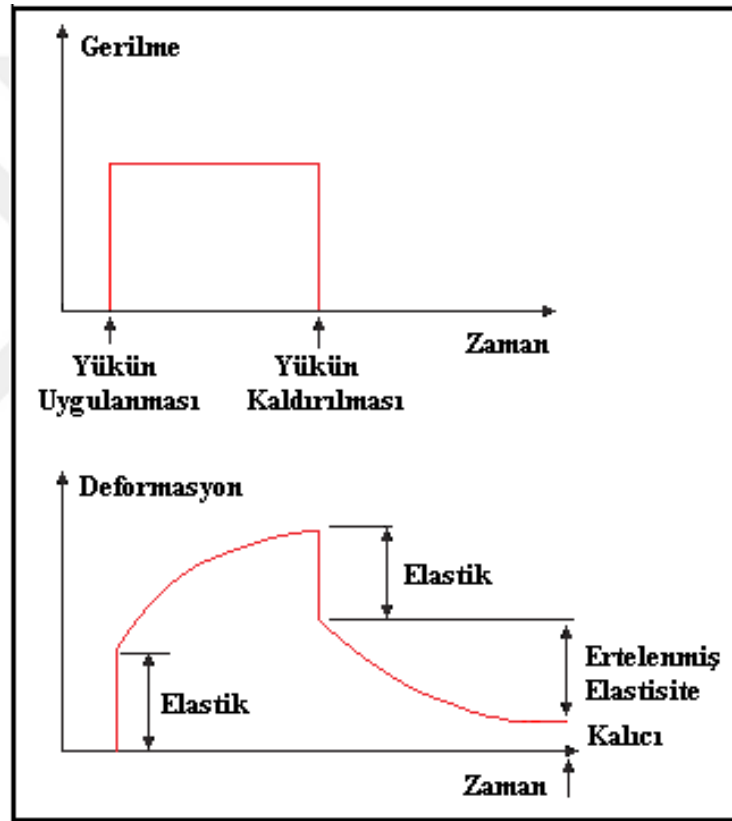
Parçalanma: Bitümün içeriğindeki yağlı ve mumlu bölümlerin yumuşama periyotları esnasında agrega vasıtasıyla absorbe edilmesi neticesinde oluşan sertleşmedir.

Sineris: Bitümün yağlı bölümlerinin ısı ve zaman faktörlerinin etkisi altında asfalttan ayrılarak sertleşmesidir (Tunç, 2004).

2.3. Bitümlü Bağlayıcılarda Katkı Kullanımı

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

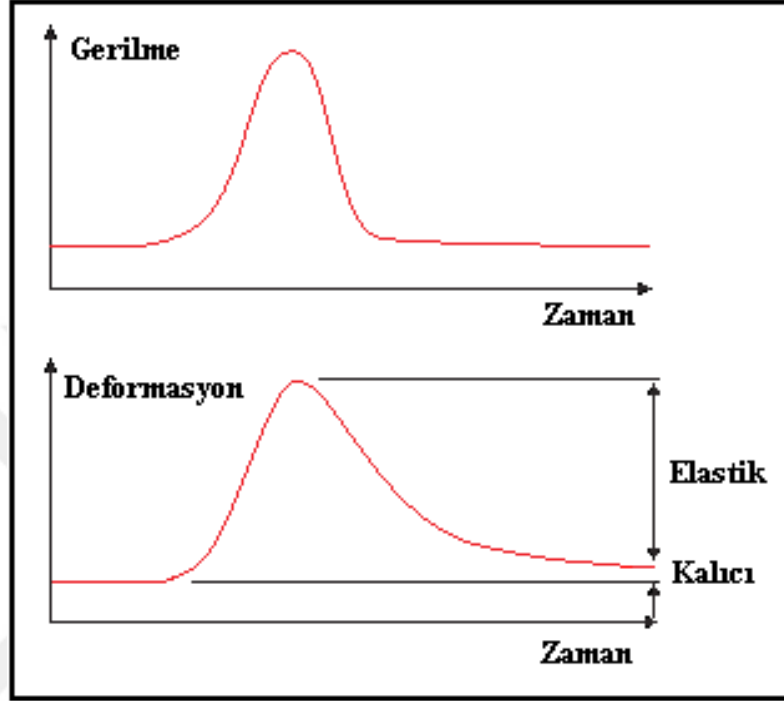
yüksek mukavemet gösterirler (Kuloğlu, 2001). Öncelikli olarak çatlama ve kalıcı deformasyon dayanımı olmak üzere, yol performansının neredeyse bütün parametrelerinde önemli rol üstlenen bitüm, asfalt karışımların da viskoelastik davranış göstermesini sağlamaktadır (Lav ve Lav, 2004). Genel olarak, kaplama yapısında oluşan deformasyon miktarı, yükleme süresine ve sıcaklık değerine bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Şekil 2.4 ve Şekil 2.5, esnek kaplamalara uygulanan yük sonucunda oluşan gerilme ve deformasyonların zamanla değişimini göstermektedir (Whiteoak ve Read, 2003).



Şekil 2.4. Bitümün statik yükler karşısındaki davranışı (Whiteoak ve Read, 2003)

Şekil 2.4’de görüldüğü gibi; yükün etki etmesiyle oluşan ani deformasyonu, yük kaldırılınca kadar dereceli olarak artan deformasyon takip etmektedir. 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 kazanılamayan ve doğrudan viskoz davranışın sebep olduğu bir miktar kalıcı deformasyon meydana gelmektedir.



Şekil 2.5. Bitümün dinamik yükler karşısındaki davranışı (Whiteoak ve Read, 2003)

Şekil 2.5’de, 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 tekrarı sonucunda kaplama yapısında büyük bozulmalara sebep olmaktadır.

Kaplamaların farklı performans parametrelerine herhangi bir olumsuz etkide bulunmadan oluşabilecek bozulmaları engellemek veya geciktirerek kaplama servis ömrünü uzatmak amacıyla katkı maddeleri kullanılmaktadır. Modifikasyon işlemi katkının bitüme eklenmesiyle modifiye bitüm üretilmesi yada asfalt plentinde karışıma eklenmesiyle modifiye karışım üretilmesi şeklinde yapılmaktadır.

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 gerekmemekte, hazırlanan modifiye bitümün depolanması ve taşınması gibi sorunlar ortaya çıkmaktadır (İlıcılı, 2001).

Karışımın modifiye edilmesinde ise, katkı maddesi asfalt plentinde karışıma katılabildiğinden ek karıştırma ekipmanı gerekmemekte, depolama, taşıma gibi sorunlarla karşılaşılmemektedir. 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 (İlıcılı, 2001).

2.3.1. Bitümlü Bağlayıcıların Modifiye Edilme Sebepleri

Bitüm ve bitümlü karışımların modifiye edilmeleri ile en genel anlamda yol üst yapılarının yüksek yol sıcaklıklarında yeterli rijitliğe sahip olarak oluklanma, ötelenme ve ondülasyon gibi deformasyonlara karşı dirençli olması düşük yol sıcaklıklarında da yeterli esnekliğe sahip olarak çatlamalara ve kırılmalara karşı dirençli olmaları amaçlanmaktadır. Ayrıca, taşıt yükleri altında yorulma sebebiyle oluşan çatlamalar ile su etkisiyle oluşan soyulmalara karşı dayanıklı olması ve kaplama yüzeyinde arzu edilen düzeyde kayma direncinin sağlanarak sürüş emniyetinin elde edilmesi amaçlanmaktadır.

Genel anlamda bu şekilde ifade edilebilen, bitümün modifiye edilme sebepleri maddeler halinde aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Düşük hizmet sıcaklıklarında daha yumuşak karışımlar üretmek ve böylece çatlakları azaltmak,
- Yüksek hizmet sıcaklıklarında daha sert karışımlar üretmek dolayısıyla tekerlek izi oluşumunu engellemek,
- Kaymaya karşı yüksek dirençli kaplama yüzeyleri elde etmek,

- Uygulama sıcaklıklarında viskoziteyi düşürerek işlenebilirliği ve sıkıştırmayı geliştirmek,
- Karışımların mukavemet ve stabilitesini arttırmak,
- Karışımların aşınma direncini arttırmak ve çözülmeyi azaltmak,
- Karışımların yorulma direncini arttırmak,
- Düşük mukavemete sahip agregaları kullanılır duruma getirmek,
- Agregaların çevresinde daha kalın bitüm tabakaları oluşturarak, bitüm ve agregaların birbirine yapışma özelliğini geliştirip soyulmayı engellemek,
- Akma dayanımını geliştirmek,
- Çatlakların dolmasını sağlamak,
- Yakıt dökülmelerine karşı dayanım sağlamak,
- Yaşlanmaya karşı dayanımı arttırmak,
- Kaplama tabakalarının yapısal kalınlıklarını azaltmak
- Yapım mevsimini uzatmak,
- Uygulama alanlarını zenginleştirmek,
- Yapıştırıcı tabaka olarak kullanabilmek,
- Kaplamaların her bakımdan performansını geliştirmek,
- Kaplamaların ekonomik olarak daha uygun olmasını sağlamak.

Üstyapı kaplamasından beklenen, ancak klasik bağlayıcılar ile sağlanamayan bu özelliklerden, söz konusu proje için özellikle hedeflenenlerin sağlanabilmesi, günümüzün teknolojik olanakları da kullanılarak, bağlayıcının ya da karışımın katkı maddeleriyle modifiye edilmesi sonucunda mümkün olabilmektedir.

Bitüm katkı maddelerinde aranılan özellikler aşağıda sıralanmıştır.

- Kolay elde edilebilmelidir,
- Asfalt karışımının üretim sıcaklıklarında özelliğini kaybetmemelidir,
- Asfalt ile homojen bir şekilde karışabilmelidir,
- Asfaltın yüksek karıştırma ve serilme sıcaklıklarında, onu aşırı viskoz hale getirmeden, yüksek yol sıcaklıklarında akışkanlığa karşı direncini arttırmalıdır,
- Düşük sıcaklıklarda ise asfaltın çok kırılgan veya sert olmamasını sağlamalıdır,

- Ekonomik olmalıdır.

Katkı maddelerinin bitüm ile karıştırılmasından sonra ise şu özelliklere sahip olması istenir:

- Depolama, uygulama ve hizmet esnasında özelliklerini korumalıdır,
- Uygun ekipman ile işlenebilirliğe sahip olmalıdır,
- Depolama, uygulama ve hizmet esnasında kimyasal ve fiziksel olarak durağan olmalıdır,
- Normal üretim sıcaklıklarında püskürtülerek agregayı sarabilmelidir.

Modifikasyon işlemi genel olarak iki türlü yapılabilmektedir. Bunlar:

1. Katkı malzemesi bitüme eklenerek, “modifiye bitüm” elde edilir.
2. Katkı malzemesi, asfalt plentinde doğrudan karışıma eklenerek, “modifiye karışım” elde edilir.

Bitümün modifikasyonunda, modifiye bitüm çeşitli standart test yöntemleri uygulanarak bitüm özelliklerindeki değişmelerin tespit edilmesi mümkün olabilmektedir. Böylece, modifiye bitümün özelliklerinin belirlenmesi ve değerlendirmesi yapılabilmektedir. Ancak, bitümün modifiye edilmesi yönteminde, bu işlem için genellikle ilave ekipmanlar gerekmekte, hazırlanan modifiye bitümün depolanması, taşınması gibi sorunlar söz konusu olmaktadır.

Karışımın modifikasyonunda ise, katkı maddesi asfalt plentinde karışıma katılabildiğinden ilave karıştırma ekipmanı gerekmemekte, depolama, taşıma v.s. gibi sorunlarla karşılaşılmamakta, ancak bu durumda da karışımdan modifiye bitümü çekerek özelliklerinin belirlenmesi ve değerlendirilmesi pratik olmamaktadır.

2.3.2. Grafit Minerali

Grafit; yumuşak, dokunulduğunda yağsımsı his veren ve ince plakalar şeklinde bükülme özelliğine sahip karbondan oluşan bir mineraldir. Gri ve siyah kül renginde bulunurlar. Grafit doğal ve sentetik olmak üzere iki ana formda sınıflandırılır. Doğal grafit kristal

karbon içeren bir mineraldir. Bu kristallik önemli ölçüde farklılık gösterir. Çoğu doğal grafit maden ve genellikle mineraller içerirler. Doğal grafit ısı ve elektriği mükemmel bir şekilde iletir. Doğal grafit; kristal, pul ve amorf olmak üzere üç şekilde görülür. Şekil 2.6'da grafitin katı ve toz hali görülmektedir.



Şekil 2.6. Grafit mineralinin katı ve toz hali

Grafit, küresel teknolojinin ilerlemesine bağlı olarak, kullanımı yaygınlaşan ve günümüz şartlarında vazgeçilemeyen bir endüstri hammaddesi olup, organik maddelerin başkalaşımı neticesinde meydana gelmektedir. Ülkemizde birçok yatağı bulunan grafit, zaman içerisinde önemi ve kullanımı yaygınlaşan değerli bir hammaddedir.

Grafiti çok değerli yapan ve neredeyse başka bir malzemeyle kıyaslanamamasını sağlayan çok önemli özellikleri vardır. Bunlar;

- Yüksek ısı iletkenliği
- Yüksek elektrik iletkenliği
- Isıya karşı dayanıklılığı
- Korozyona ve kimyasal maddelere karşı dayanıklılığı
- Oksidasyona ve aside karşı dayanımı
- Yağlayıcı olarak kullanılabilme özelliğidir.

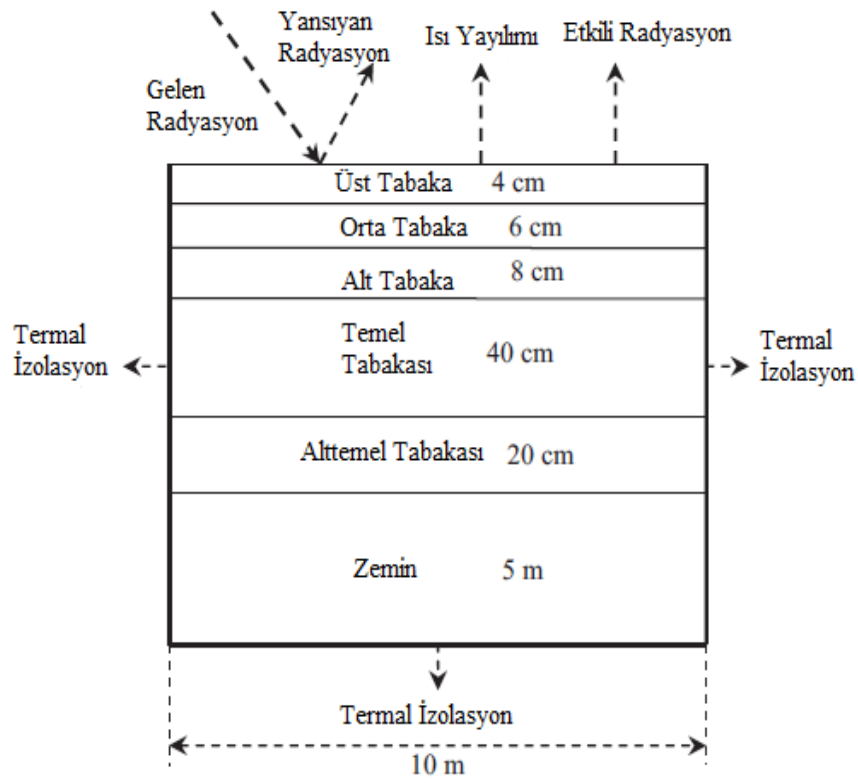
2.3.3. Modifiye Bitüm Üretiminde Grafitin Katkı Maddesi Olarak Kullanılması

Günümüzde bitümün ve bitümlü sıcak karışımların özelliklerini iyileştirmek amacıyla mineral, organik, doğal ve endüstriyel kökenli katkıları yaygın olarak kullanılmaktadır (Bardesi ve Brule, 1999).

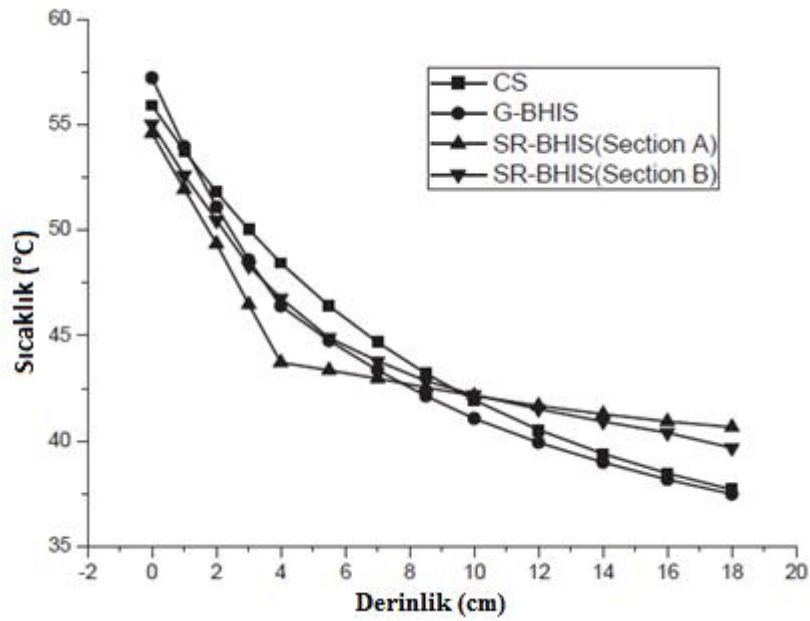
Kullanılacak en uygun katkı maddesinin seçiminde aranan özellik sadece katkının bitüme veya karışıma sağlayacağı performans değildir. Buna ek olarak katkı maddesinin üretiminde çevresel uyum ve ekonomik olma gibi faktörler de katkının seçiminde göz önünde bulundurulmak zorundadır. Yukardaki nedenlerden dolayı grafit gibi katkı maddeleri sıcak karışım uygulamalarında kullanılmaktadır.

2.3.4. Grafitin Kullanıldığı ve Yaşlanmayla İlgili Yapılan Çalışmalar

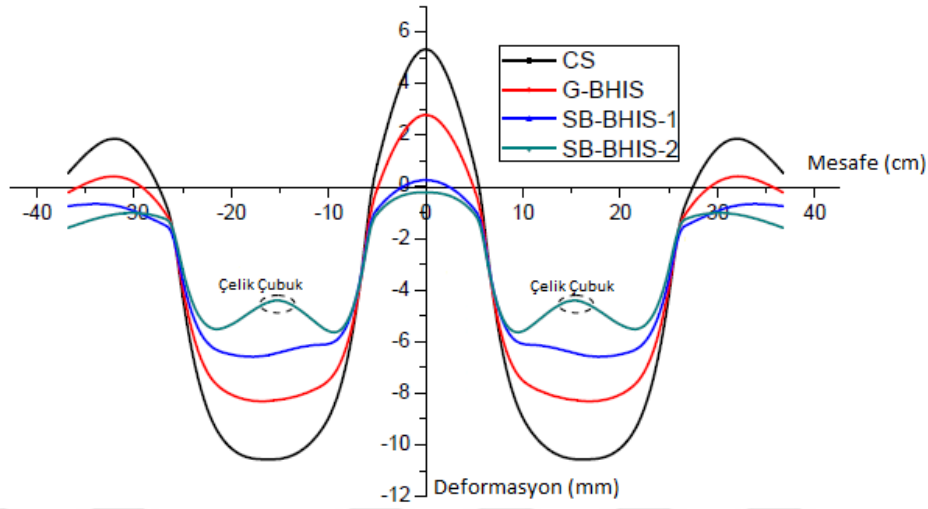
Grafit katkısının kullanıldığı bir çalışmada; asfalt kaplamada ısı iletiminin artırılarak kaplamadaki ısının tutulmadan alt tabakalara ve daha sonra zemine aktarılması amaçlanmıştır. Şekil 2.7’de bir ısı transfer modelinin kurulduğu çalışmada kontrol asfalt numunesi (CS), grafit içeren asfalt numunesi (G-BHIS) ve çelik çubuk ile grafit içeren asfalt numunesi (SB-BHIS) hazırlanmıştır. Şekil 2.8’de hazırlanan numunelerin farklı derinliklerdeki maksimum sıcaklıkları verilmiştir. Şekil 2.9’da ise yapılan numunelerin tekerlek izi eğrileri gösterilmiştir. Grafit katkısı ve çelik çubuklar yardımıyla bitümlü sıcak karışım numunelerinin termal iletkenliği artırılmış böylelikle ısıyı bünyesinde tutmadan transfer etmesi sağlanmıştır. Yapılan deneyler sonucunda 4 cm derinlikte BSK’nın sıcaklığının 6,5°C’ye kadar düşmesi sağlanmıştır. Sıcaklığın azalmasının neticesi olarak tekerlek izi derinliği %43,4 kadar azalmıştır (Du ve Wang, 2015).



Şekil 2.7. Isı transfer modeli diyagramı (Du ve Wang, 2015)



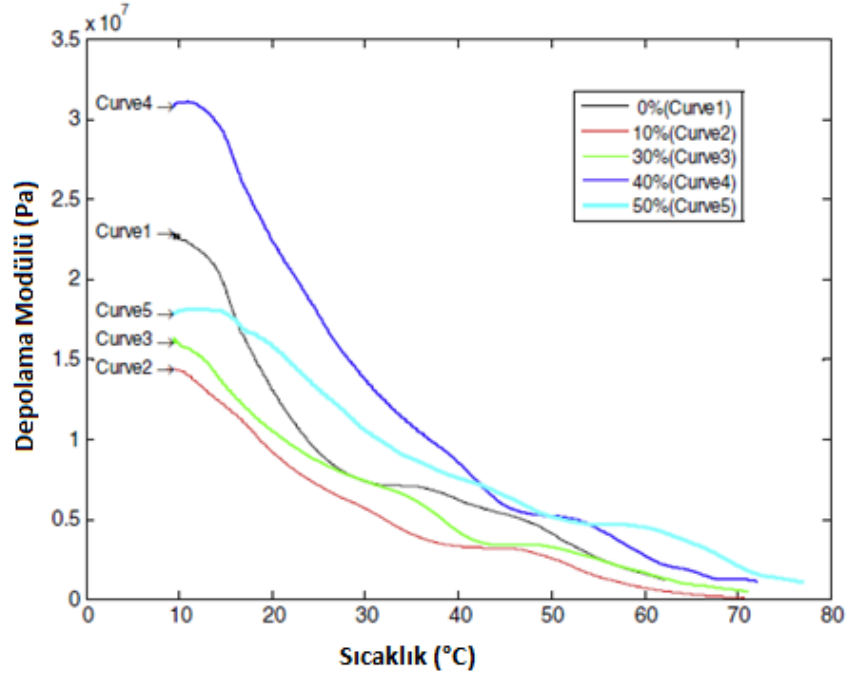
Şekil 2.8. Numunelerin farklı derinliklerdeki maksimum sıcaklıkları (Du ve Wang, 2015)



Şekil 2.9. Numunelerin farklı derinliklerdeki tekerlek izi eğrileri (Du ve Wang, 2015)

Asfalt kaplamaların elektrik ve yol performans özelliklerinin grafit ve karbon fiber gibi iletken malzemeler kullanılarak değiştirilmek istendiği bir uygulamada sıcak karışımların özellikleri iyileştirilmeye çalışılmıştır. Bağlayıcının yumuşama noktası $45,4^{\circ}\text{C}$, duktilitesi 167,3 cm, penetrasyonu 65 olarak ölçülmüştür. Çalışmada kullanılan grafitin yoğunluğu $2,1 \text{ g/cm}^3$ termal iletkenliği $59,32 \text{ W/mK}$ olmak üzere ağırlıkça %98,9 karbon, %0,2 kül ve %0,03 demir bileşenlerinden oluşmaktadır. Parçacık boyutu 150 mikrondan daha küçük ve elektriksel direnç $10^{-4} \Omega\text{cm}$ olarak ölçülmüştür. Agreganın yoğunluğu $2,93 \text{ g/cm}^3$ maksimum boyutu 19 mm ve elektriksel direnci $10^{14} \Omega\text{cm}$ 'dan daha fazla olduğu bulunmuştur. Şekil 2.10'da farklı oranlarda grafit içeren bitümlü bağlayıcının depolama stabilitesi değerlerinin sıcaklıkla değişimi verilmiştir. Şekilde, eğim 2 ve 3'de görüldüğü gibi grafit tozu oranı %30'dan daha fazla olana kadar grafit parçacıklarının eklenmesi depolama modülünü arttırmamıştır. Ancak aşırı grafit tozu oranı depolama stabilitesi azaltmıştır. Şekilden depolama stabilitesini artırmak için eklenmesi gereken optimum grafit miktarı ağırlıkça %40 olarak bulunmuştur. Tablo 2.1'de farklı oranlarda grafit ve karbon fiber eklenerek oluşturulan modifiye bitümlerle üretilen sıcak karışım numunelerinin dinamik analiz, Marshall stabilite ve akma, indirek çekme mukavemeti ve elektrik direnç ölçüm testlerinin sonuçları verilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda %40 grafit ve %0,3 karbon fiber içeren modifiye bitümden elde edilen bitümlü sıcak karışım numunelerinin

elektrik direncinin %10 azaldığı, Marshall stabilite ve akma değerinin %4, bölünme direncinin %18 ve dinamik stabilitesinin %78 arttığı belirlenmiştir (Liu vd., 2014).



Şekil 2.10. Farklı grafit yüzdelğinde asfalt bağlayıcının depolama modülü (Liu vd., 2014)

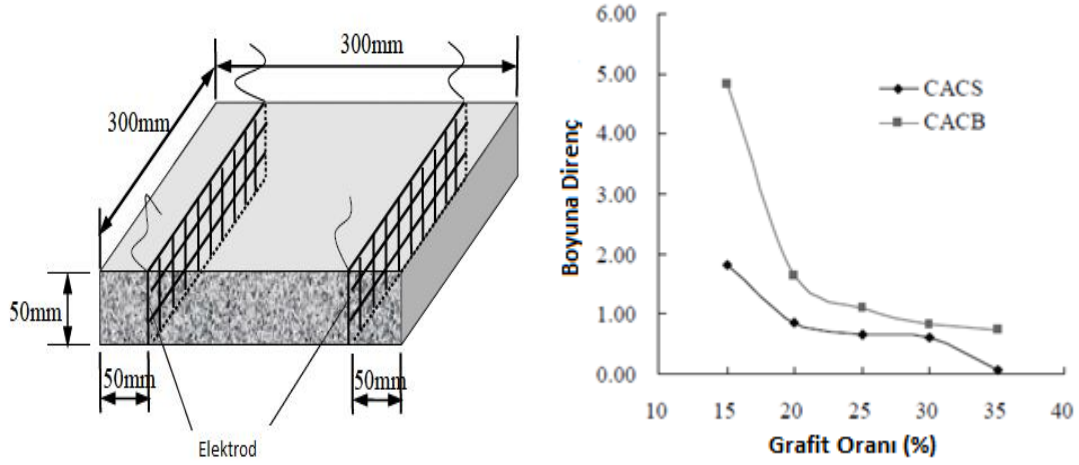
Tablo 2.1. Farklı filler bileşenlerinde asfalt karışımın test sonuçları (Liu vd., 2014)

Filler Oranı (%)		Elektriksel Direnç (Ω)	Marshall Stabilitesi (kN)	İndirek Çekme Mukavemeti (MPa)	Dinamik Stabilite (s)
Grafit	Karbon fiber				
0	0	∞	13.48	2.02	2320
10	0	∞	12.9	1.89	2061
30	0	∞	11.7	1.86	1988
40	0	1023	11.4	1.82	1890
50	0	543	10.76	1.46	1650
0	0.3	∞	16.4	2.58	5392
40	0.1	835	11.69	1.92	2051
30	0.3	536	15.18	2.49	4592
40	0.3	433	14.0	2.38	5140
40	0.6	405	13.67	2.21	5130

Lu ve diğ. agregası bazalt (CACB) ve çelik curufundan (CACS) oluşan iki farklı karışımda grafit kullanımının etkilerini araştırmışlardır. Özellikle çelik cürufu kullanımında agrega-agrega teması sağlanarak iyi bir iletkenlik elde etmek ve grafitin boşlukları doldurarak performans üzerinde olumsuz etki yapmasını önlemek için karışımlar taş-mastik gradasyonunda hazırlanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre aynı koşullar altında CACS'ın elektriksel direncinin CACB'nin elektriksel direncinden daha az olduğu belirlenmiştir. Tablo 2.2'de görüldüğü gibi %15 grafit içeren CACS'ın elektriksel direncinin 100 Ω m'den daha az ve grafitin aynı oranda eklendiği CACB'nin yaklaşık binde biri olduğu belirlenmiştir. İletkenlik özelliklerinin tespitinde kullanılan numunelerin boyutu 300x300x50 mm'dir. Elektrod olarak paslanmaz 50x300 mm boyutunda malzemenin kullanıldığı düzenek ve grafit içeriğiyle boyuna direncin değişimi Şekil 2.11'de verilmiştir. Grafikte görüldüğü gibi %20 grafit içeriğine kadar dirençte önemli miktarda değişim olduğu halde daha sonraki içeriklerde bu etki azalmıştır. Grafit içeriğiyle Marshall stabilite, kalıcı Marshall stabilitesi, donma-çözülme oranı ve dinamik stabilite değerlerinin değişimi Tablo 2.3'de verilmiştir. Burada görüldüğü üzere grafit içeriğinin artışı Marshall stabilite, kalıcı Marshall stabilitesi, donma-çözülme oranı ve dinamik stabilite değerlerini düşürmüştür. Donma-çözülme oranı ve dinamik stabilite değerlerinin grafit içeriğiyle değişimi Şekil 2.12'de verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi grafit içeriğinin artışıyla dinamik stabilite sürekli azalırken donma-çözünme oranında ise %15 grafit içeriğinden sonra dalgalanma olmuştur (Lu vd., 2008).

Tablo 2.2. Kaplama tipine göre grafit oranı ile elektrik direnci değişimi (Lu vd., 2008)

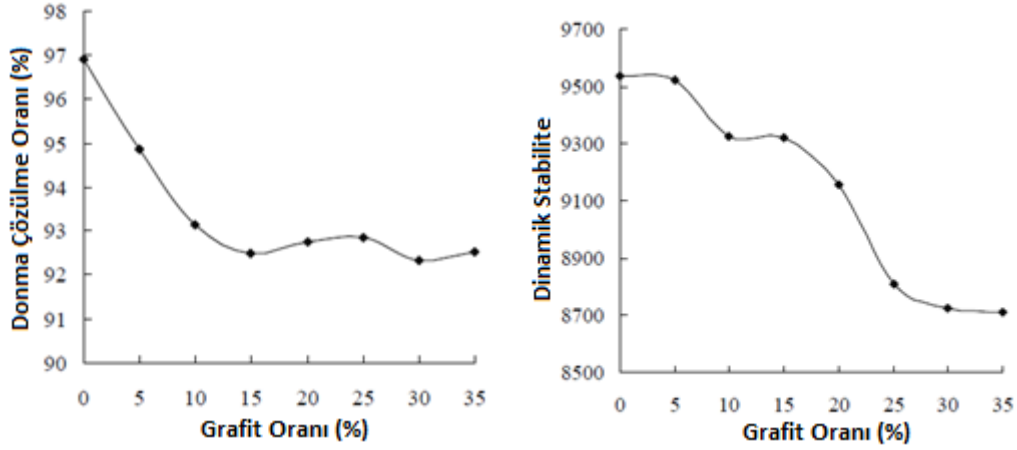
Asfalt Kaplama Tipi	Grafit Oranı (%)							
	0	5	10	15	20	25	30	35
CACS	1.17E+09	8.28E+08	2786.55	64.80	7.06	4.53	4.20	1.21
CACB	-	-	-	65710.20	43.35	12.59	6.75	5.35



Şekil 2.11. Deney düzeneği ve grafit içeriğiyle boyuna direncin değişimi (Lu vd., 2008)

Tablo 2.3. Farklı grafit oranlarında CACS'ın performans özellikleri (Lu vd., 2008)

Özellikler	Standart Gereksinimler	Grafite Oranı (%)							
		0	5	10	15	20	25	30	35
Marshall Stabilite(kN)	>6.0	12.95	12.35	11.78	11.47	11.36	11.18	10.85	10.24
Marshall Kalıcı Stabilite(%)	>85	94.98	94.21	93.74	93.23	92.77	92.45	92.21	92.17
Donma Çözülme Oranı(%)	>80	96.89	94.85	93.13	92.51	92.76	92.85	92.33	92.52
Dinamik Stabilite (zaman/mm)	>3000	9535	9521	9323	9319	9155	8810	8725	8713



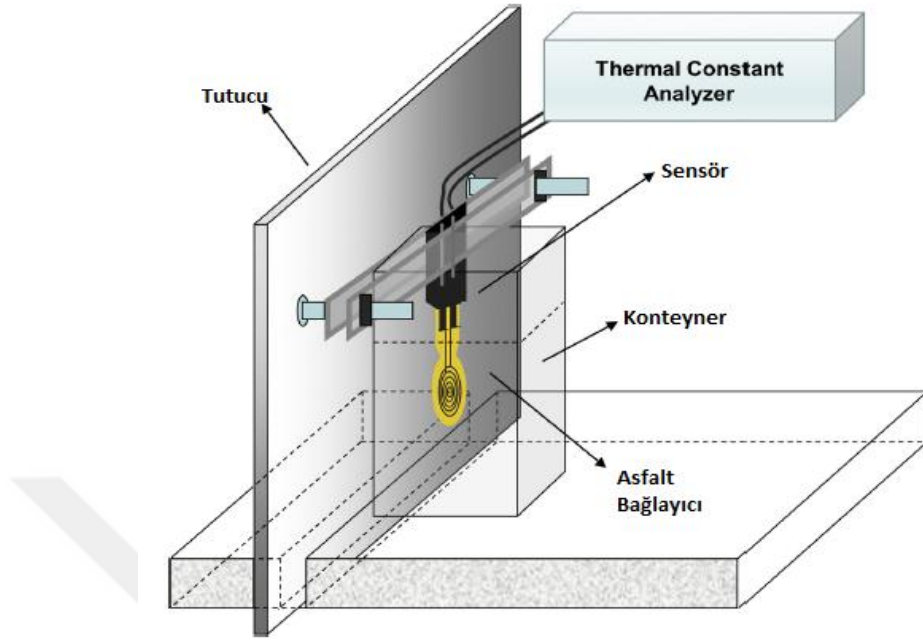
Şekil 2.12. Grafrit içeriğiyle donma-çözülme indeksi ve dinamik stabilitenin değişimi (Lu vd., 2008)

Hidronik asfalt kaplanması (HAP) yazın güneş enerjisini soğurmayı kışın kaplamayı çözmeyi amaçlayan gelişmekte olan bir teknolojidir. Kaplama malzemesinin termal iletkenliğini artırmak bu yeni sistemin uygulama etkinliğini geliştirmek için temel prensiptir. Pan ve diğ., asfalt bağlayıcının termal karakteristik ve yaşlanma özellikleri üzerinde grafitin etkisini deneysel olarak araştırılmıştır. Kıyaslama yapabilmek amacıyla Tablo 2.4’de bileşenleri verilen grafit içermeyen (CAB), %10 grafit içeren (GMAB-10), %20 grafit içeren (GMAB-20), %30 grafit içeren (GMAB-30) ve %40 grafit içeren (GMAB-40) bağlayıcılar hazırlanmışlardır. Daha sonra hazırlanan asfalt bağlayıcıların termal ve fiziksel özelliklerindeki değişim kısa süreli yaşlanma (RTFOT), uzun süreli yaşlanma (PAV) ve ultraviyole yaşlanma (UV) testi yardımıyla araştırılmıştır. Aynı zamanda, asfalt bağlayıcının termal özellikleri üzerinde grafitin etkisi Thermal Constants Analyzer yardımıyla da araştırılmıştır. Asfalt bağlayıcının termal özelliklerinin ölçümü Şekil 2.13’de şematik olarak gösterilmiştir. Düzenek yardımıyla asfalt bağlayıcıda kullanılan grafitin bağlayıcının termal iletkenliği, termal yayılımı ve özgül ısı kapasitesi değerlerine etkisi incelenmiştir. Grafrit ve mineral fillerin çeşitli oranlarıyla modifiye edilen asfalt bağlayıcının yüksek sıcaklık depolama stabilitesi test edilmiş ve sonuçlar Şekil 2.14’de verilmiştir. Açık bir şekilde görüldüğü gibi mineral filler yerine kullanılan grafit içeriğinin artışı ile depolama stabilitesi sonrası yumuşama noktası sıcaklığındaki farklılıklar azalmaktadır. Grafrit bileşeni %0’dan %40’a artarken CAB ve GMAB numuneleri arasındaki yumuşama noktası farklılıkları sırasıyla yarım saat depolama için

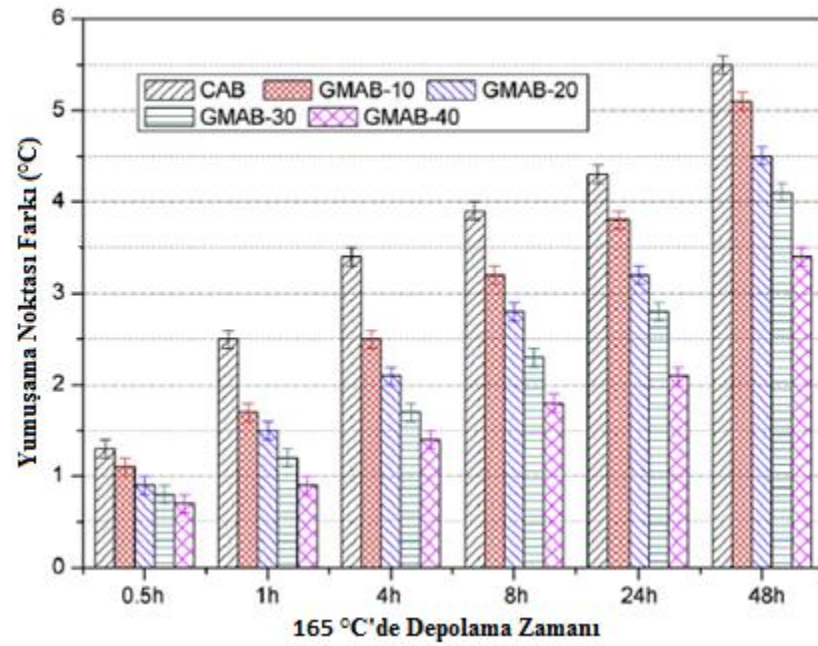
0,6°C ve 48 saat depolama için 2,2°C azalmıştır. Bunun sebebinin mineral fillerin grafitten daha yüksek bir yoğunluğa sahip olması dolayısıyla uzun süreli depolamada dibe çöktüğü yada grafitin bitümlü bağlayıcı ile daha iyi uyum içinde olduğu ve yüksek oranda yağ absorpsiyonu gerçekleştirmesi olarak düşünülmüştür. GMAB-40 asfalt bağlayıcısının yumuşama noktalarındaki fark sadece 3,4°C olmasına rağmen 48 saat depolama süresinden sonra bile teknik şartname için gerekli değerden yani 2,5°C'den yüksektir. Pratik uygulamada grafit modifiyeli asfalt bağlayıcıyı depolamanın uygun olmayacağı belirlenmiştir. Asfalt bağlayıcıların fiziksel özellikleri yaşlanmayla birlikte çalışılmış ve sonuçlar sırasıyla Şekil 2.15 ve Şekil 2.16'da gösterilmiştir. Yaşlanmadan sonra yumuşama noktası ve penetrasyon arasındaki farklılıklar asfalt bağlayıcının yaşlanma özelliklerini değerlendirmek için kullanılmıştır. Sıcaklığın 0°C ile 30°C aralığında değiştiği durumda her bir asfalt bağlayıcı için 10 rad/s'de kayma modülü (G^*) ve faz açısı (δ) değerlerinin sıcaklığa bağlı değişimi Şekil 2.17'de gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlar grafit mineralinin artışı ile asfalt bağlayıcının kayma modülünün arttığını ve faz açısının azaldığını göstermiştir. Yaşlanmış numuneler ile orijinal asfalt bağlayıcının fiziksel ve reolojik özellikleri karşılaştırıldığında grafitin asfalt bağlayıcının yaşlanma özelliğini iyileştirdiği belirlenmiştir (Pan vd., 2014).

Tablo 2.4. Grafit modifiyeli bitümlü bağlayıcının bileşenleri (Pan vd., 2014)

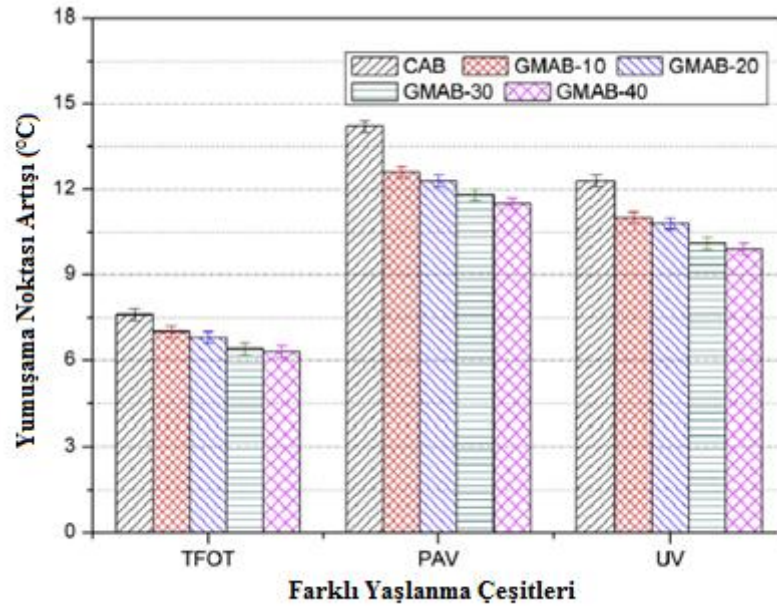
Asfalt Bağlayıcı	Bileşen (gr)				
	CAB	GMAB-10	GMAB-20	GMAB-30	GMAB-40
Asfalt	501.1	502.4	499.1	500.5	501.8
Mineral Filler	501.1	452.2	399.3	350.4	301.1
Grafit	0.0	50.2	99.8	150.1	200.7



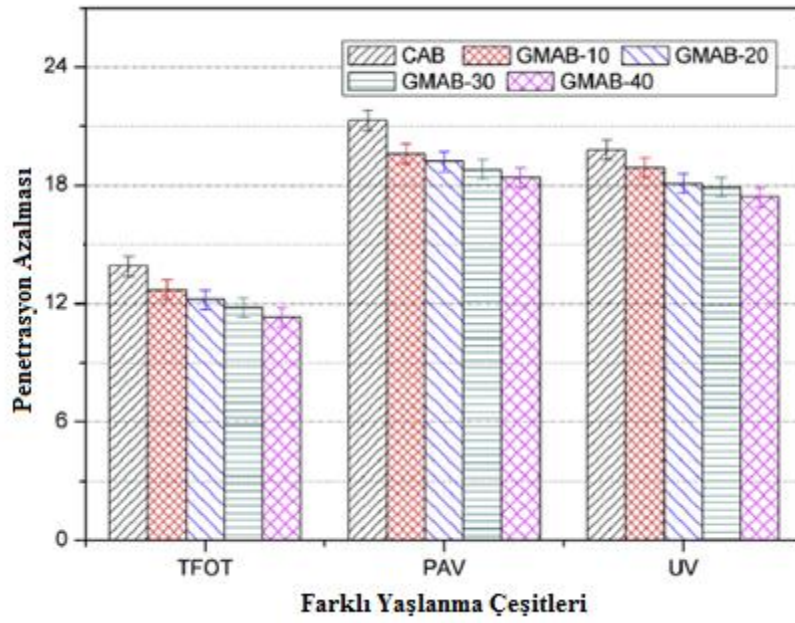
Şekil 2.13. Bitümlü bağlayıcının termal özellikleri ölçümünün şematik sunumu (Pan vd., 2014)



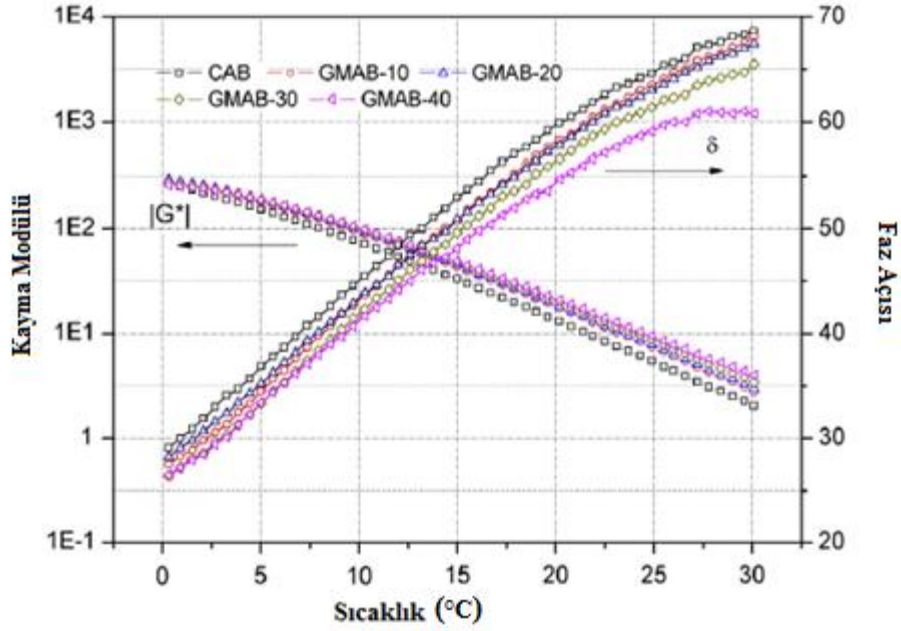
Şekil 2.14. Grafit yüzdesi ve depolama stabilitesi arasındaki ilişki (Pan vd., 2014)



Şekil 2.15. Yaşlanmış asfalt bağlayıcıların yumuşama sıcaklıklarındaki değişim (Pan vd., 2014)

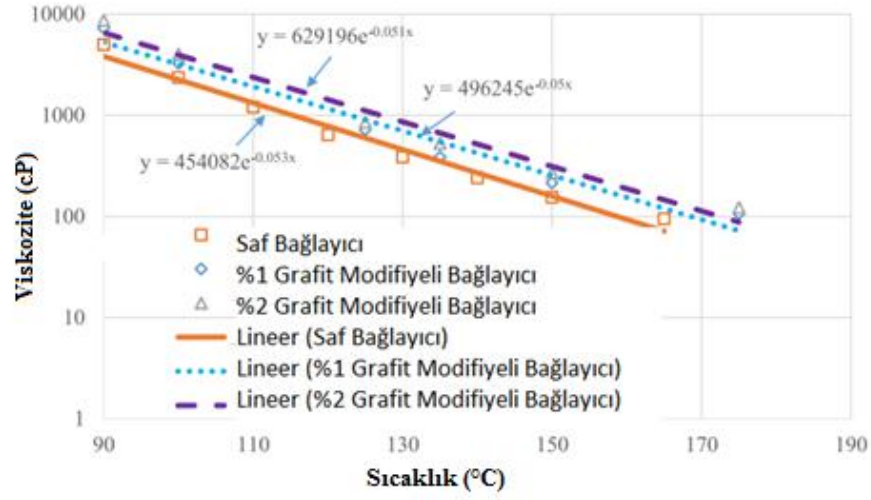


Şekil 2.16. Yaşlanmış asfalt bağlayıcıların penetrasyon değerlerindeki değişim (Pan vd., 2014)

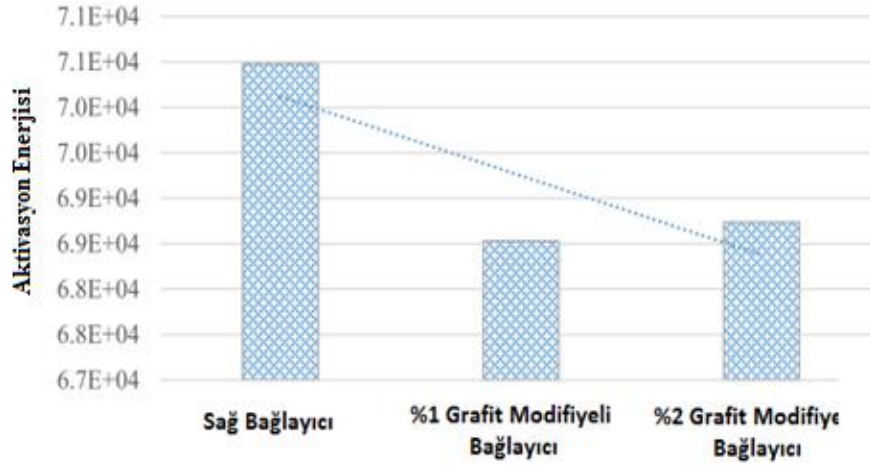


Şekil 2.17. Asfalt bağlayıcıların kayma modülü ve faz açısının sıcaklıkla değişimi (Pan vd., 2014)

Kaplamalar genel olarak 4 temel gerilmeye maruz kalırlar. Bunlar tekerlek izi, nem hasarı, termal çatlak ve yorulma çatlaklarına neden olan gerilmelerdir. Modifiye asfalt bağlayıcılar kaplamalarda meydana gelen bu gerilmeleri engellemek için tasarlanırlar. Yao ve diğ. % 1 ve % 2 oranlarında grafit katkılı bağlayıcılara dönel viskozimetre ve dinamik kayma reometresi testleri uygulamışlardır. Şekil 2.18’de grafit içeriğiyle birlikte viskozitenin değişimi görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi grafit içeriği arttıkça viskozite değerleri yükselmiştir. Ayrıca bitümün sıvı hale geçmesi için gerekli olan aktivasyon enerjisi de Şekil 2.19’da değerlendirilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere grafit içeriği arttıkça aktivasyon enerjisi azalmıştır. Bu sonuçlara göre grafit asfalt bağlayıcının yüksek sıcaklık performansını iyileştirmiştir (Yao vd., 2016).



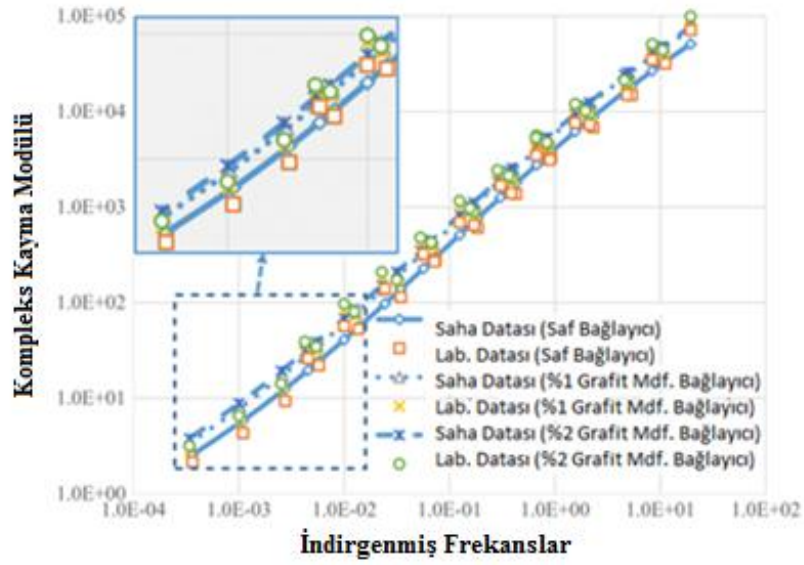
Şekil 2.18. Grafit içeriğine bağlı olarak viskozite-sıcaklık ilişkisi (Yao vd., 2016)



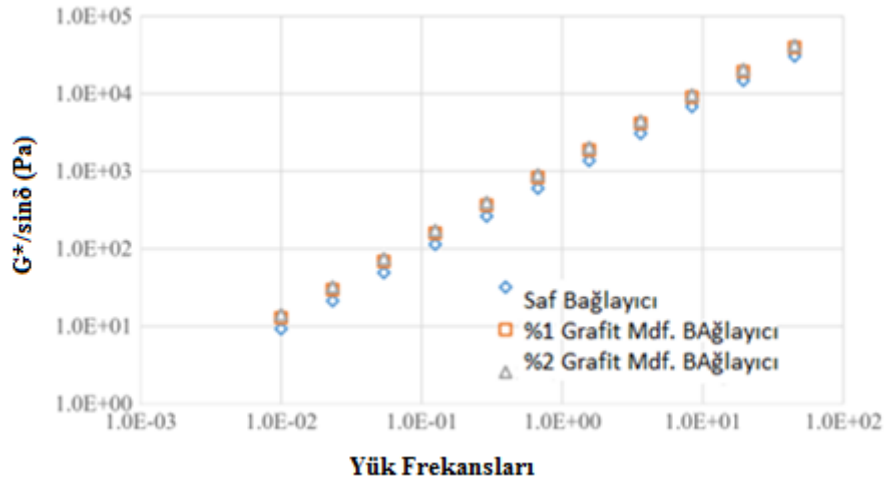
Şekil 2.19. Grafit içeriğine bağlı olarak aktivasyon enerjisi değişimi (Yao vd., 2016)

Bağlayıcıların elastik ve viskoz davranışını karakterize etmek üzere dinamik kayma reometresi testi yapılmıştır. Kompleks kayma modülü ve faz açısı farklı sıcaklıklar için belirlenmiştir. Ayrıca depolama modülü değerleri belirlenmiştir. Şekil 2.20’de grafit içeriğiyle birlikte kompleks kayma modülü değerlerindeki değişimler görülmektedir. Şekilden de çıkarılacağı üzere grafit içeriği arttıkça kayma modülü değerleri yükselmiştir.

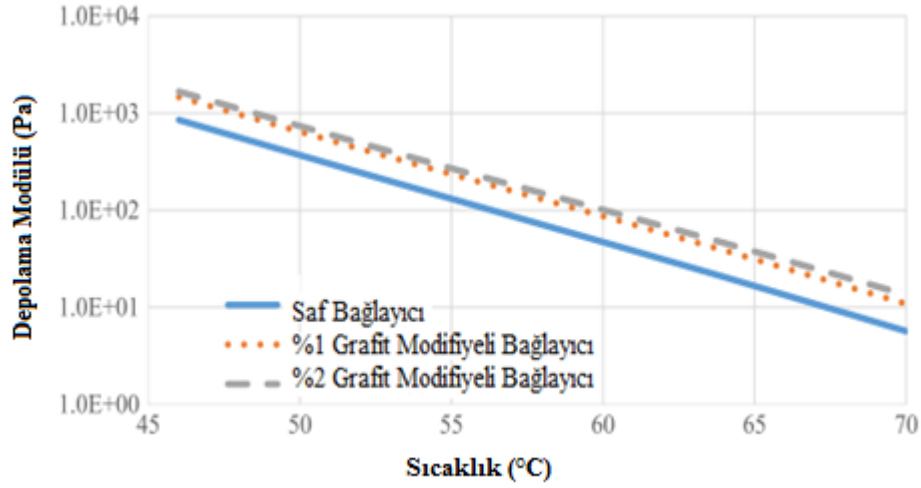
Şekil 2.21’de grafit içeriğinin değişimi ile birlikte $G^*/\sin\delta$ değerlerindeki artış görülmektedir. Şekil 2.22’de ise grafit içeriğinin değişimi ile birlikte depolama modülünün de arttığı tespit edilmiştir. Bu sonuçlara göre grafit katkısı asfalt bağlayıcının yüksek sıcaklıktaki tekerlek izi dayanımını iyileştirmiştir (Yao vd., 2016).



Şekil 2.20. Grafit içeriğine bağlı olarak kompleks kayma modülü değişimi (Yao vd., 2016)



Şekil 2.21. 58°C’de Grafit içeriğine bağlı olarak $G^*/\sin\delta$ değerlerinin değişimi (Yao vd., 2016)



Şekil 2.22. Grafit içeriğine bağlı olarak depolama modülünün değişimi (Yao vd., 2016)

Yüksek özgül yüzey alanı dikkate alındığında, grafit tozu serbest haldeki daha fazla asfaltı yapısal hale dönüştürebilir. Teorik olarak grafit, asfalt içeren malzemelerin termal, elektrik ve mekanik özelliklerini diğer mineral tozlardan daha fazla geliştirmektedir. Ayrıca, elektriksel iletkenlik artışı asfalt karışımların akıllı birer malzeme bileşenine dönüştürebilmektedir. Grafitle elektriksel iletkenliği artırılan asfalt karışımların kendini izleyen bir yapıya dönüşeceği ve sonuç olarak kendi içerisinde meydana gelen hasarları engelleyebileceği belirtilmiştir. Asfalt çimentosunun geliştirilmesi gereken özelliklerinden biri de, düşük yumuşama sıcaklığıdır. Hava sıcaklığının 40°C'nin üzerinde olduğu yerlerde düşük yumuşama noktasına sahip bağlayıcılar önemli sorun teşkil etmektedir. Yüksek hava sıcaklığı ayrıca kaplamanın performansını da sınırlamaktadır. Tekerlek izi sıcak iklime sahip bölgelerde asfalt kaplamaların en yaygın problemidir. Liu ve diğ. yaptıkları çalışmada katkı maddesi olarak grafit ve karbon fiber kullanarak bitümün özelliklerini iyileştirmeye çalışılmışlardır. Farklı oranlarda katkı maddesi eklenerek hazırlanan saf ve modifiye bitümlere yumuşama noktası, dinamik kesme reometresi ve elektriksel direnç deneyleri uygulanmıştır. Bitüme grafit tozu eklenmesiyle birlikte yumuşama noktası sıcaklığındaki değişim Tablo 2.5'de gösterilmiştir. Modifiye bitümlerde, grafit ve bitüm arasında oluşan yüksek ara yüzey alanı, grafit tozu yüzeyini kapsayan asfalt polimer zincirlerinin oluşmasını sağlamıştır. Bunun bir sonucu olarak, grafit bileşeni arttıkça

yumuşama noktası sıcaklığı artmıştır. Yumuşama noktası sıcaklığı grafitin %9 eklenmesiyle 45°C'den 70°C'ye çıkmıştır. Farklı grafit bileşen oranlarında bitümün yüksek sıcaklık özelliklerini çalışmak amacıyla DSR testi grafit modifiyeli bitümlere uygulanmıştır. Sonuçlar Tablo 2.6'da gösterilmiştir. Grafit bileşeni %0'dan %9'a artırıldığında tekerlek izi parametresi ($G^*/\sin \delta$) 40°C'de 1555 kPa'dan 3745 kPa'a çıkmıştır. Grafit bileşeni oranı ile elektrik iletkenlik arasındaki değişim Tablo 2.7'de gösterilmiştir. Grafit tozu oranı artışı ile beraber asfaltın termal iletkenliği artmıştır. Grafitin %13 oranında kullanıldığı durumda asfaltın elektrik iletkenliği $8,7 \times 10^{-11}$ den $8,9 \times 10^{-2}$ ye çıkmıştır buda kompozit sistemde grafit parçacıklarının birbirine bağlanmasında üç boyutlu elektriksel iletkenlik ağının etkili olduğunu göstermiştir. Elektriksel iletkenliğin artışı asfaltın yalıtkan halden iletken hale dönüştüğünü bununda iletken özelliğe sahip asfalta kendini izleme özelliği kazandırdığını göstermiştir (Liu vd., 2008).

Tablo 2.5. Grafit oranı ile yumuşama noktası sıcaklığının değişimi (Liu vd., 2008)

Grafit İçeriği (%)	Yumuşama Noktası Sıcaklığı (°C)
0	45.4
2.0	50.7
5.0	53.6
7.0	58.8
9.0	70.2

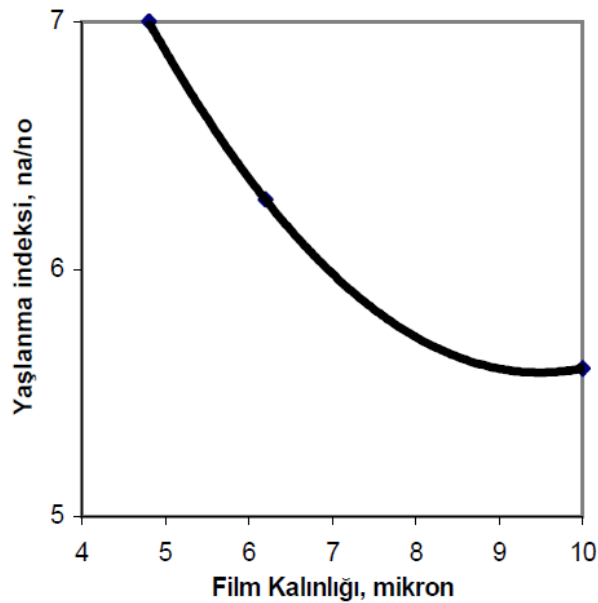
Tablo 2.6. Grafit oranı ile tekerlek izi parametrelerinin değişimi (Liu vd., 2008)

Grafit İçeriği (%)	Tekerlek İzi Parametresi ($G^*/\sin \delta$), kPa					
	40°C	50°C	60°C	70°C	80°C	85°C
0	1.555	1.028	0.613	0.455	-	-
2.0	1.856	1.015	0.746	0.511	0.410	-
5.0	2.523	1.365	0.923	0.712	0.611	0.450
7.0	3.026	1.726	0.987	0.851	0.632	0.516
9.0	3.332	1.936	1.459	1.026	0.884	0.706

Tablo 2.7. Grafit oranı ile elektriksel iletkenliğin değişimi (Liu vd., 2008)

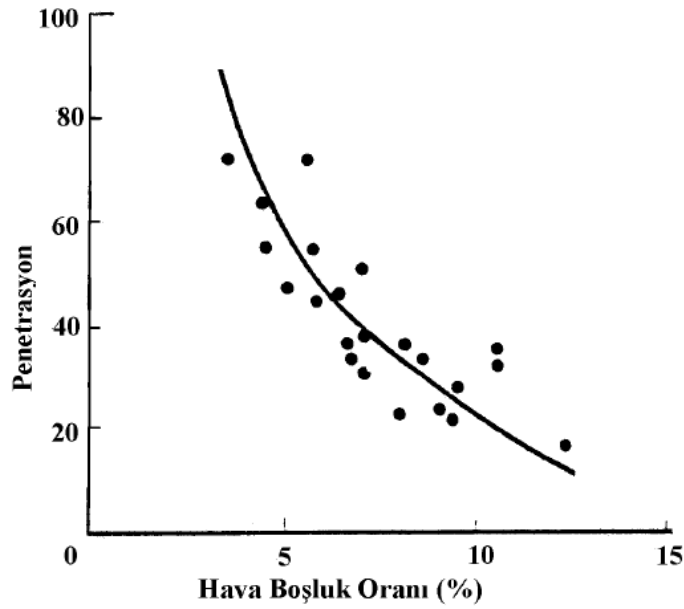
Grafit İçeriği (%)	Elektriksel İletkenlik (S/cm)
0	-
2.0	8.7×10^{-11}
5.0	4.4×10^{-9}
7.0	6.7×10^{-6}
9.0	3.5×10^{-3}

Kaplamadan beklenen performans büyük oranda bitümlü bağlayıcının özelliklerine bağlıdır. Bağlayıcının performansını etkileyen en önemli parametrelerden biri ise yaşlanmadır. Bitümlü sıcak karışımlarda karıştırma esnasındaki yaşlanma; karıştırma süresi, sıcaklık, bağlayıcı yüzdesi ve film kalınlığı gibi faktörlere bağlıdır. Bitümlü karışımların yapımı esnasında agrega ve filler kalınlığı 15μ 'a kadar erişebilen bağlayıcı film tabakasıyla kaplanmaktadır. Şekil 2.23'de bağlayıcı film kalınlığıyla yaşlanma indeksi arasındaki ilişki görülmektedir. Yaşlanmanın doğrudan göstergesi olan yaşlanma indeksi ise, yaşlanmış bitümün viskozite değerinin saf bitümün viskozite değerine oranıdır.



Şekil 2.23. Yaşlanma indeksi ve film kalınlığı arasındaki ilişki (Griffin vd., 1955)

Bitümlü sıcak karışımlarda yaşlanmayla ilgili yapılan çalışmalarda, yaşlanmaya neden olan en önemli parametrelerin, hava boşluk oranının yüksek olması, bitüm film tabakasının inceliği ve yüksek hava geçirgenliği olduğu belirtilmiştir. Şekil 2.24’de karışımlarda hava boşluğunun artmasıyla penetrasyon değerinin düştüğü yani bitümün sertleştiği dolayısıyla yaşlandığı belirlenmiştir.

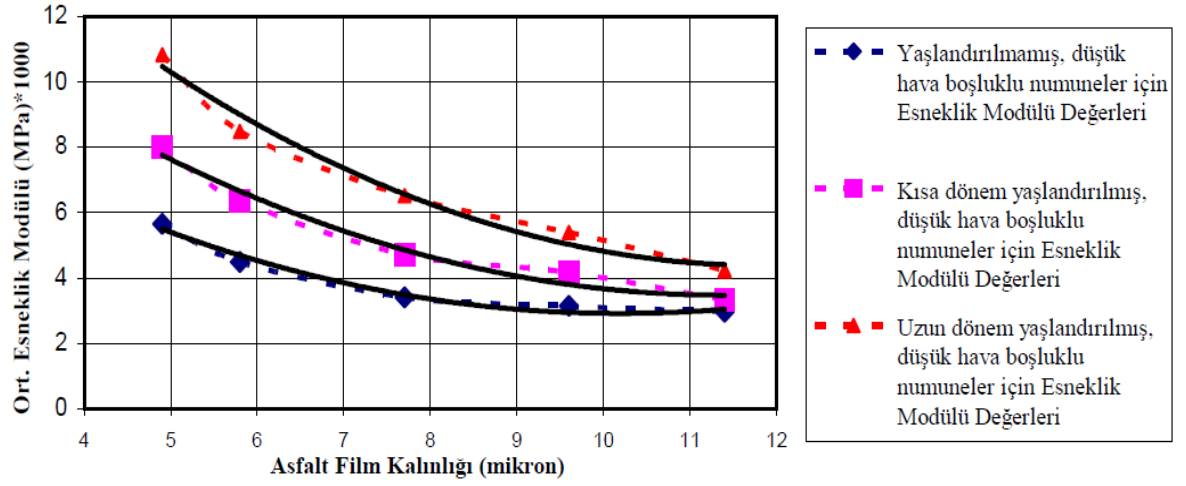


Şekil 2.24. Yaşlanma ve hava boşluğu arasındaki ilişki (Lubbers, 1985)

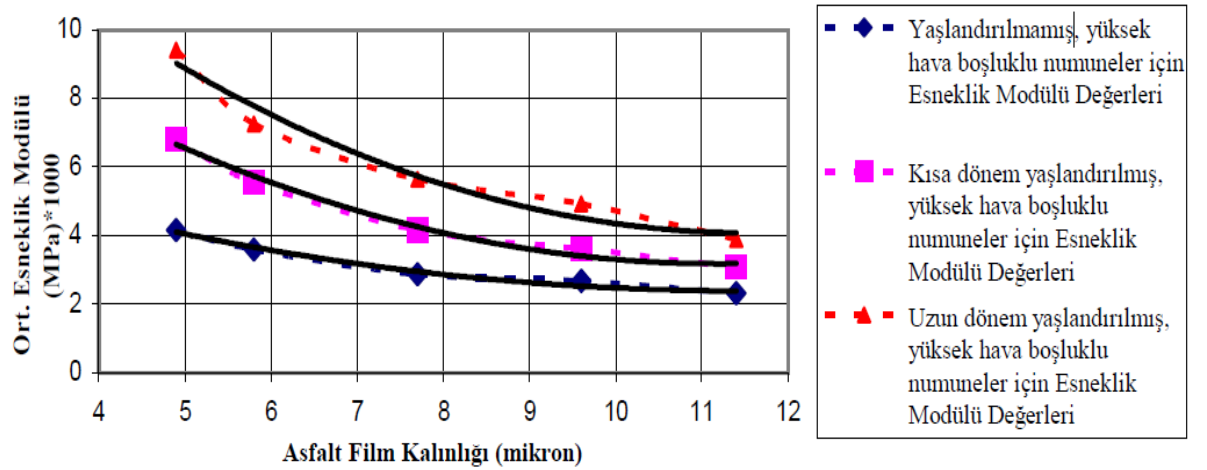
Hava geçirgenliği yaşlanma ilişkisine bakıldığında ise karışımdan geçen havanın akış hızının yaşlanmayı tetiklediği, buna zıt olarak düşük geçirgenliğin kaplamayı ve altındaki tabakaları koruduğu belirlenmiştir (Kumar ve Goetz, 1977).

Bağlayıcı film kalınlığının ve hava boşluğunun yaşlanma üzerine etkisinin araştırıldığı bir başka çalışmada farklı hava boşluk oranlarına sahip numuneler, kısa (135°C, 4 saat) ve uzun dönem (85°C, 120 saat) yaşlanmaya tabi tutularak esneklik modülü değerleri belirlenmiş ve aralarında karşılaştırma yapılmıştır. Şekil 2.25 ve Şekil 2.26’da asfalt film kalınlığı esneklik modülü grafiğinde farklı yaşlanmalara tabi tutulmuş numunelerin sonuçları görülmektedir. Elde edilen sonuçlar neticesinde; bitümlü bağlayıcılar yaşlanmaya maruz kaldıkça esneklik modülü artmıştır. Yüksek hava boşluğuna sahip numuneler daha

çabuk yaşlanmıştır. Şekiller dikkatli bir şekilde incelendiğinde film kalınlığının 9µ değerinde olduğu durumlarda eğrinin yatıklaştığı görülmüştür. Yani film kalınlığının 9µ'dan küçük olduğu durumlarda yaşlanma etkisinin daha belirgin bir şekilde ortaya çıktığı belirlenmiştir (Şengöz ve Ağar, 2005).

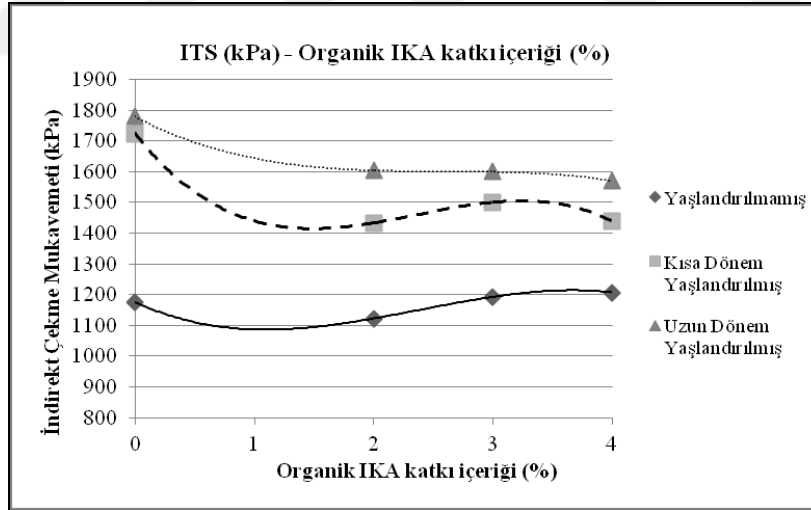


Şekil 2.25. Düşük hava boşluklu karışımların film kalınlığı ve esneklik modülü arasındaki ilişki (Şengöz ve Ağar, 2005)



Şekil 2.26. Yüksek hava boşluklu karışımların film kalınlığı ve esneklik modülü arasındaki ilişki (Şengöz ve Ağar, 2005)

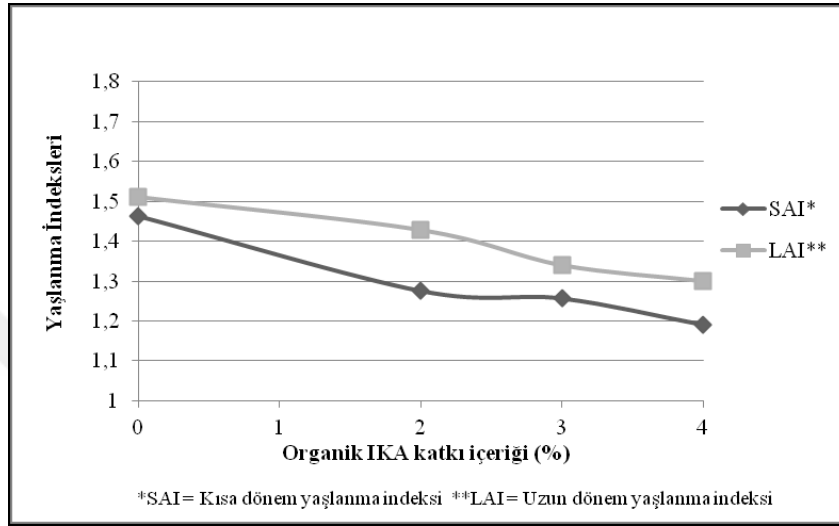
Son yıllarda yapılan çalışmalar, bitümlü sıcak karışımların yerini alacak, ondan daha iyi performans verecek, çevreyi koruyacak, üretim masraflarını azaltacak kaplama türlerinin üzerine yoğunlaşmıştır. Bu kapsamda ılık karışım asfaltlara ciddi bir yönelim olmuştur. Bu yöntemde bitüm, düşük sıcaklıklarda kullanıldığı için daha az enerji harcanmaktadır. Ayrıca bitüm üretim sırasında yüksek sıcaklıklara maruz kalmadığı için kısa dönem yaşlanma etkisi ciddi derecede azalmakta ve sertleşmenin önüne geçilmektedir. Dokandari ve diğ. yaptıkları çalışmada, organik ılık karışım katkısının bitümlü karışımların yaşlanması üzerindeki etkisi incelenmiştir. Burada kullanılan katkı kömürün karbonizasyon işlemiyle elde edilen FT parafin mumudur. Katkı maddesi karışımlara %2, %3 ve %4 oranlarında katılmıştır. Şekil 2.27’de katkılı ve saf karışımların yaşlandırılmış ve yaşlandırılmamış durumda indirek çekme mukavemetlerindeki (ITS) değişim görülmektedir. Şekilden görüldüğü gibi indirek çekme mukavemet sonuçları arasındaki fark katkı içeriği arttıkça azalmaktadır.



Şekil 2.27. Ilık karışım katkısı ve indirek çekme mukavemeti arasındaki ilişki (Dokandari vd., 2014)

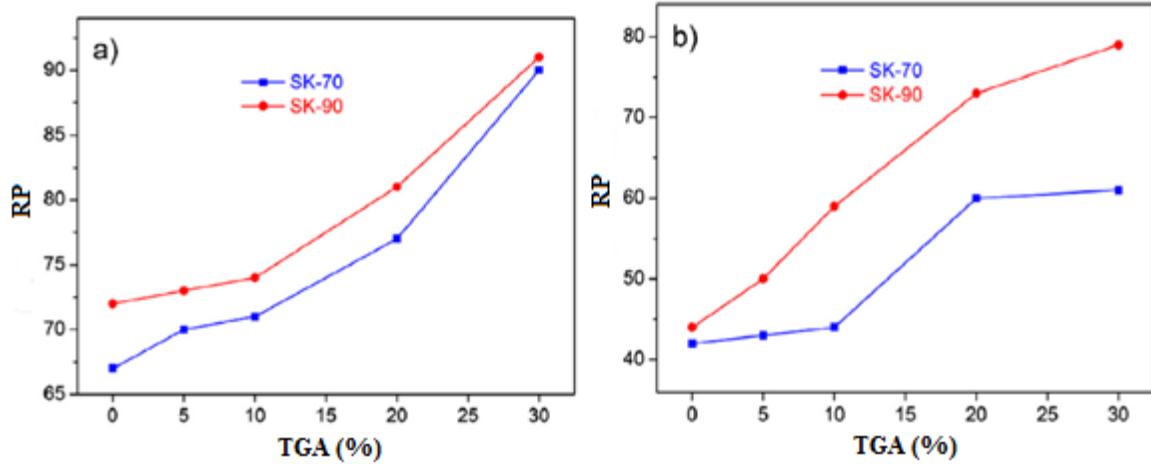
Ayrıca kısa ve uzun dönem yaşlandırılmış karışımların indirek çekme mukavemeti sonuçlarının yaşlandırılmamış karışımların indirek çekme mukavemeti sonuçlarına bölünmesiyle yaşlanma indeksi değerleri elde edilmiştir. Böylece uzun dönem yaşlanma indeksi değerleri ve kısa dönem yaşlanma indeksi değerleri hesaplanmıştır. Şekil 2.28’de ılık karışım katkısı oranıyla yaşlanma indeksi değerlerinin değişimi görülmektedir.

Yaşlanma indeksinin düşük olması karışımın yaşlanmaya karşı dirençli olduğunun göstergesidir. Şekilde katkı oranının artmasıyla yaşlanma indeksinin azaldığı ve dolayısıyla karışımın yaşlanmaya karşı direncinin arttığı görülmektedir (Dokandari vd., 2014).



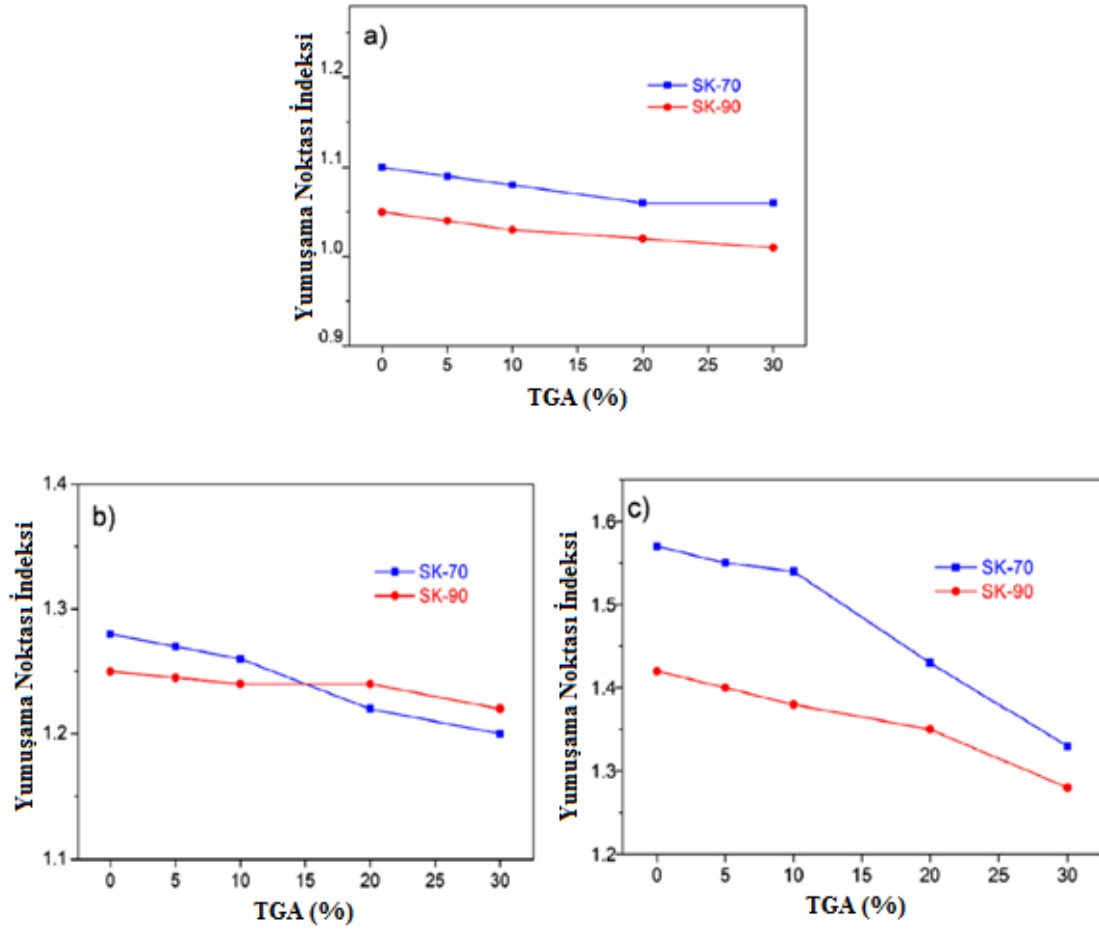
Şekil 2.28. İlık karışım katkısı ve yaşlanma indeksi arasındaki ilişki (Dokandari vd., 2014)

Bitüme Trinidad göl asfaltının (TGA) katkı olarak eklendiği bir çalışmada bitümün yaşlanma özelliklerindeki değişimler araştırılmıştır. Yapılan çalışmada 70/90 penetrasyon sınıflı bağlayıcı ve %5, %10, %20 ve %30 oranında Trinidad göl asfaltı kullanılmıştır. Numuneler yaşlandırmaya tabi tutulurken ince film haline ısıtma (RTFOT), basınçlı yaşlandırma kabı (PAV) ve ultraviyole radyasyon (UV) testleri yapılmıştır. Yaşlanmanın etkisini belirlenmek üzere, yaşlanmış numunelerin penetrasyon değeri yaşlanmamış numunelerin penetrasyon değerine bölünüp 100 ile çarpılarak kalıcı penetrasyon (RP) değerleri bulunmuştur. Şekil 2.29'da RTFOT ve PAV'da yaşlandırılmış trinidad göl asfaltı modifiyeli bağlayıcıların katkı içeriğiyle birlikte kalıcı penetrasyon değerlerindeki değişimler görülmektedir. Şekilden çıkarılabileceği gibi bitüme katkı olarak eklenen Trinidad göl asfaltı içeriği arttıkça kalıcı penetrasyon değerleri artmıştır yani Trinidad göl asfaltı bitümün kısa ve uzun dönem yaşlanma özelliklerini iyileştirmiştir (Li vd., 2015).



Şekil 2.29. Trinidad göl asfaltı içeriğiyle RP değerlerinin değişimi (Li vd., 2015)

Çalışmada yaşlanma özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan diğer parametre yumuşama noktası oranı olarak belirlenmiştir. Bu değer yaşlanmış numunenin yumuşama noktası değerinin yaşlanmamış numunenin yumuşama noktası değerine bölünmesiyle bulunmuştur. Şekil 2.30'da RTFOT, PAV ve UV'de yaşlandırılmış Trinidad göl asfaltı modifiyeli bağlayıcıların katkı içeriğiyle yumuşama noktası oranı değerlerindeki değişimler görülmektedir. Şekilden görüldüğü gibi bitüme katkı olarak eklenen Trinidad göl asfaltı içeriği arttıkça numunelerin yumuşama noktası oranı değerleri azalmıştır ve sonuç olarak Trinidad göl asfaltı bitümün yaşlanma özelliklerini iyileştirmiştir.

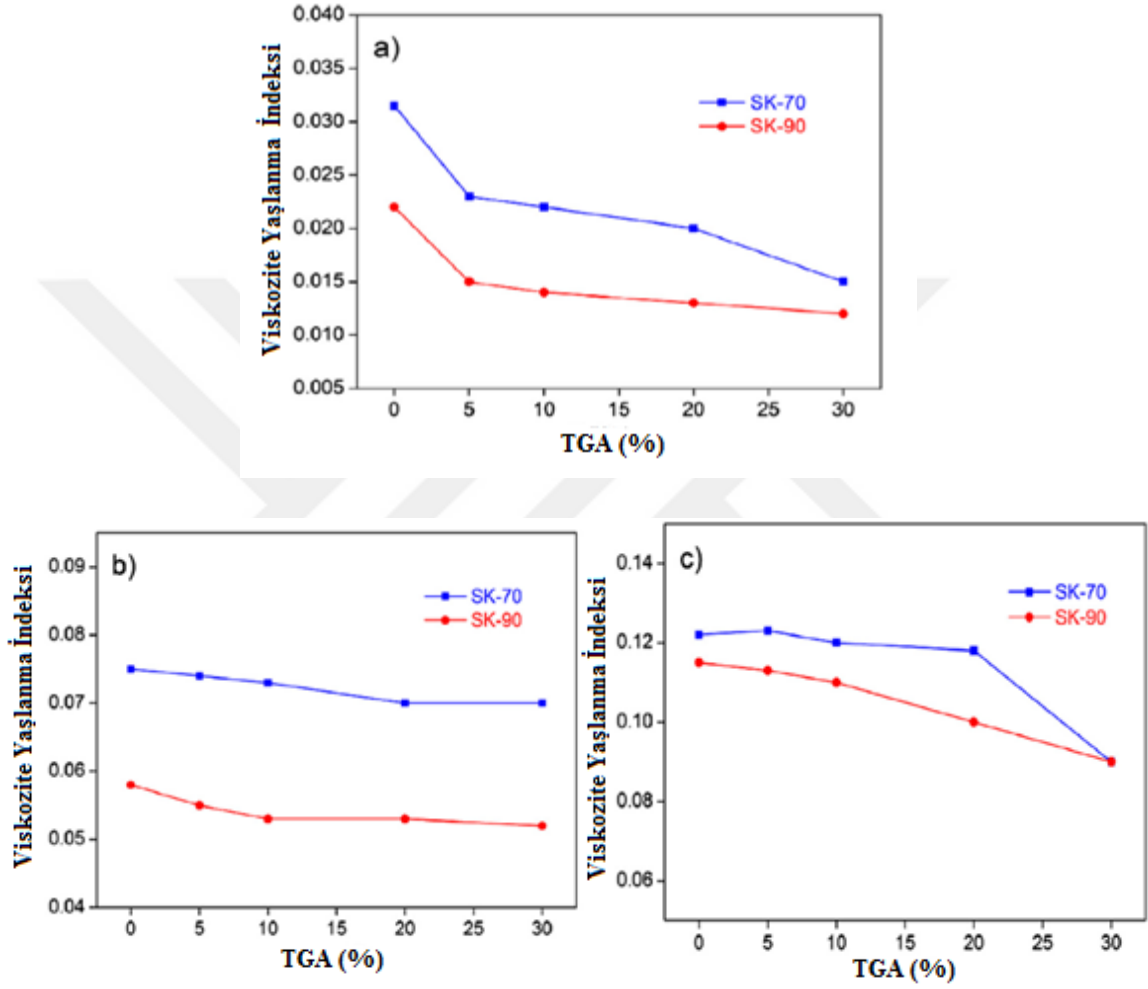


Şekil 2.30. Trinidad göl asfaltı içeriğiyle RTFOT, PAV ve UV yaşlandırmada yumuşama noktası indeksi (Li vd., 2015)

Çalışmada yaşlanma özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan son parametre ise viskozite yaşlanma indeksidir. Bu değer bağıntı (2.1) yardımıyla bulunmuştur. Şekil 2.31’de RTFOT, PAV ve UV’de yaşlandırılmış Trinidad göl asfaltı modifiyeli bağlayıcıların katkı içeriğiyle viskozite yaşlanma indeksi değerlerindeki değişimler görülmektedir. Şekilden görüldüğü gibi bitüme katkı olarak eklenen Trinidad göl asfaltı içeriği arttıkça numunelerin viskozite yaşlanma indeksi değerleri azalmıştır dolayısıyla Trinidad göl asfaltı bitümün yaşlanma özelliklerini iyileştirmiştir.

$$C = \lg \lg (n_2 \times 10^3) - \lg \lg (n_1 \times 10^3) \quad (2.1)$$

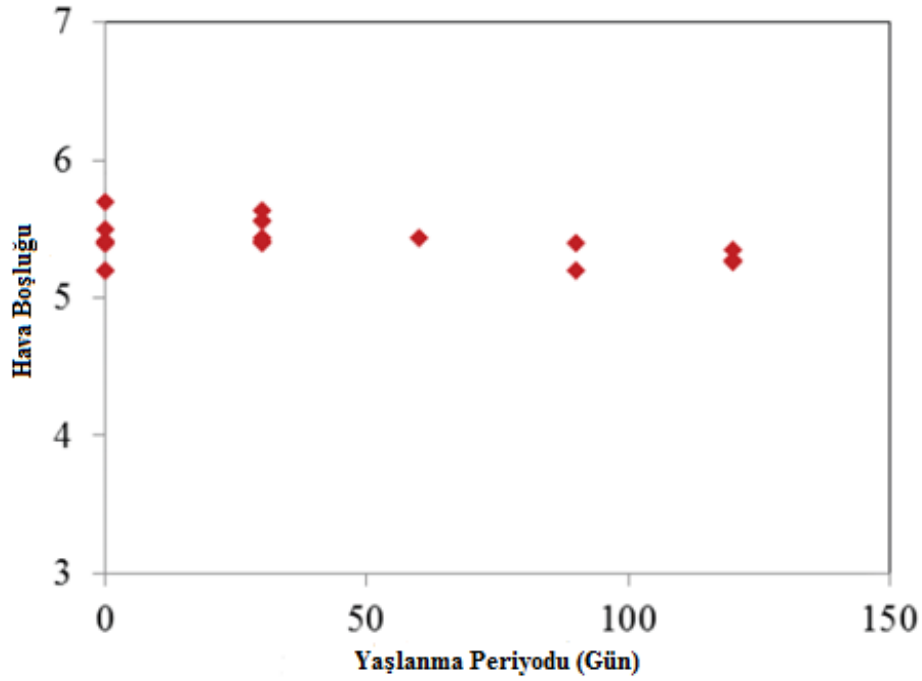
Burada; C viskozite yaşlanma indeksi, n_1 yaşlanmamış bağlayıcının viskozitesi, n_2 yaşlanmış numunenin viskozitesini ifade etmektedir (Li vd., 2015).



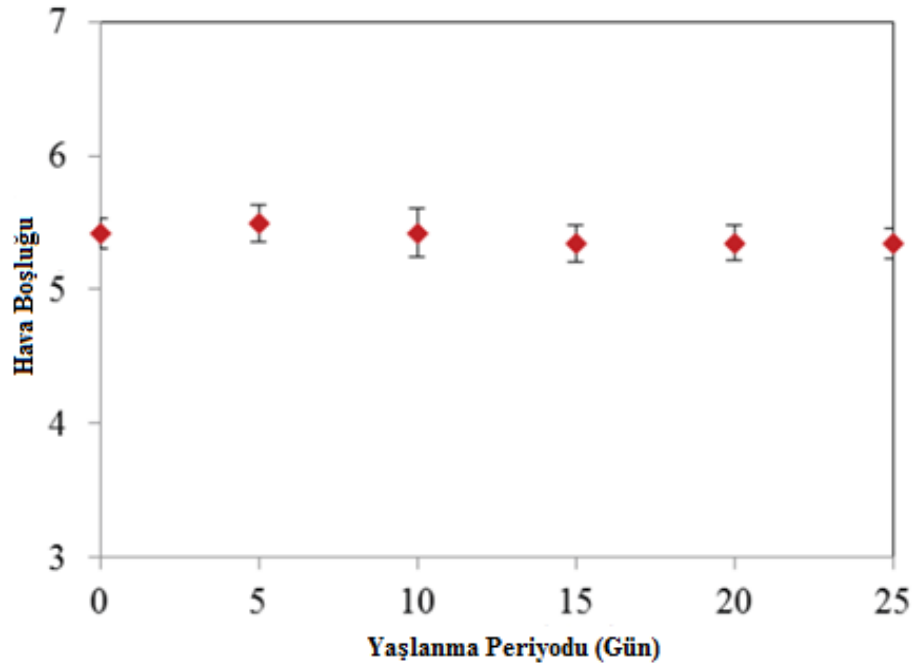
Şekil 2.31. Trinidad göl asfaltı içeriğiyle RTFOT, PAV ve UV yaşlandırmada viskozite yaşlanma indeksi (Li vd., 2015)

Uzun ömürlü kaplama tasarımı için, servis ömrü ile asfaltın özelliklerinin iyileştirilmesi/değiştirilmesinin doğru bir şekilde belirlenmesi esastır. İslam ve diğ. yaşlanmanın bitümlü karışımın hava boşluğu üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Bu amaçla laboratuvar da hazırlanan numuneleri doğal arazi yaşlanmasına ve yapay laboratuvar etüv yaşlanmasına tabi tutulmuştur. Hazırlanan numunelerin hava boşluğu %5,1'den %5,9'a çeşitlilik göstermektedir ve ortalama değer olarak %5,4 alınmıştır. Saha

yaşlanmasına bırakılan numuneler yaz aylarında maksimum 54°C sıcaklığa ve kış aylarında minimum -11°C sıcaklığa maruz kalmıştır. Bölgenin yağmurları ve nemiyle birlikte yaklaşık 91 defa donma-çözülme döngüsüne maruz kalmıştır. Laboratuvarında etüvde yapılan yaşlanmada ise numuneler 85°C’de 120 saat bekletilmiştir. Bu zaman arlığından sonra etüv kapatılıp kapağı açılarak 16 saat oda sıcaklığında soğutulmuştur. Farklı koşullardaki periyotları göz önünde bulundurmak için süreç 5 kere tekrar edilmiştir. Şekil 2.32’de 120 günlük saha yaşlanması sonucunda elde edilen veriler gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi yaşlanmayla hava boşluğu değişmemiştir. Şekil 2.33’de 25 günlük laboratuvar yaşlanması sonucunda elde edilen sonuçlar gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi yaşlanmayla hava boşluğu yaklaşık olarak aynı kalmıştır (Islam vd., 2016).



Şekil 2.32. Saha yaşlanmasında hava boşluğu değişimi (Islam vd., 2016)



Şekil 2.33. Laboratuvar yaşlanmasında hava boşluğu değişimi (Islam vd., 2016)

3. KARAYOLU YAPISI

Yol gövdesi üstyapı ve altyapı olarak isimlendirilen iki kısımdan meydana gelir. Altyapı toprak işleri ve sanat yapılarından meydana gelir. Üstyapı ise taşıtların yüklerini altyapıya (taban zeminine) ileterek yayan katmanlı bir yapıdır. Üstyapı, taşıt yüklerini altyapının taşıyabileceği miktarlara indirmek, altındaki yapıyı koruyarak pürüzsüz bir yuvarlanma yüzeyi elde etmek amacı ile altyapının üstüne konumlandırılan, alttemel, temel ve bağlayıcı içeren kaplamalardan oluşan katmanlı yol elemanıdır. Üstyapılar, kullanılan malzemelerin özelliklerine göre esnek ve rijit olmak üzere iki gruba ayrılır. Bu iki gruptan biri yolun oturacağı zemine, taşıt yoğunluğuna, çevre etkilerine ve ekonomik faktörlere bakılarak seçilir (Avcı, 2009; Sağlık ve Güngör, 2008).

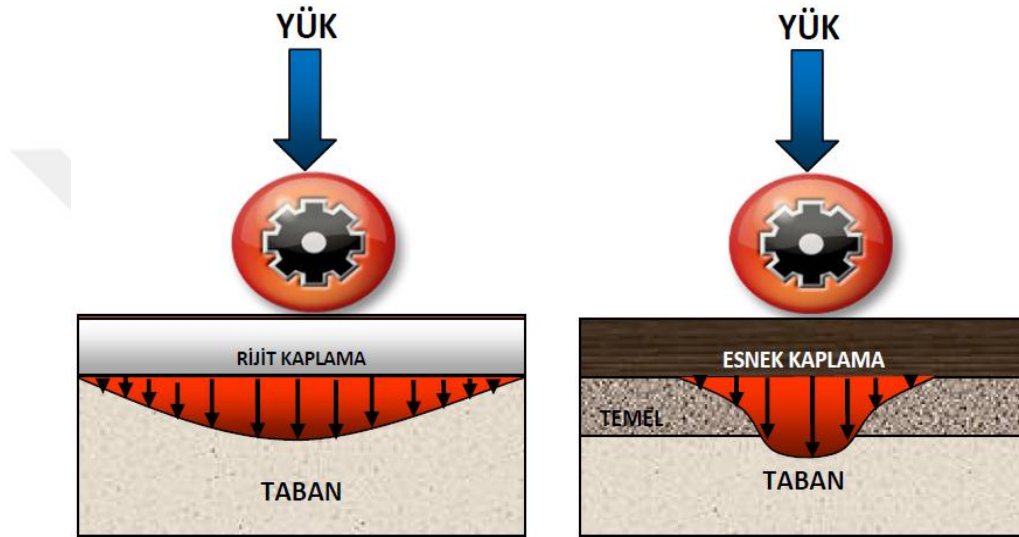
Yüklerin büyük bölümünün, bağlayıcı olarak portland çimentosunun kullanıldığı beton plak aracılığıyla taşındığı, artan bölümünün altyapıya devredildiği üstyapı tipine rijit üstyapı denir. Rijit üstyapılar, yol zemini üstüne dökülen donatılı yada donatısız betondan oluşur. Beton yol olarak da adlandırılan rijit üstyapının yük kapasitesi, elastisite modülü ve bunlara paralel olarak rijitliği oldukça yüksektir. Rijit üstyapılarda, sıcaklık ve nemin etkisiyle, taşıt ağırlıklarından kaynaklanan gerilmeler neticesinde beton çatlayabilir. Bu çatlakları engellemek yada çatlakların belirli bölgelerde oluşmasını sağlamak için rijit üstyapıya derzler bırakarak kaplamayı bağımsız hareket eden plaklar şeklinde ayırmak gerekir. Rijit üstyapılar uzun servis ömürleri için uygulanır. İlk yatırım maliyetleri esnek üstyapılara oranla yüksek olmasına karşın, beton yollar servis ömürleri süresince bakım ve onarıma fazla gerek duymazlar (Giriş, 2007).

Esnek üstyapı içerisinde bitümlü bağlayıcının kullanıldığı bir üst yapı tipidir. Esnek üstyapı taşıt yüklerini tabakalara aktarma yoluyla tabii zemine ileten bir üstyapı tipi olup, stabilitesi; dane sürtünmesi, adezyon ve kohezyon gibi parametrelere bağlıdır. Esnek kaplamalar;

- Karışım tipi kaplamalar (bitümlü sıcak karışımlar)
- Yüzeysel kaplamalar olmak üzere ikiye ayrılır.

En önemli esnek kaplama malzemesi olan agrega, tek başına bir temel görevi gördüğü gibi çok basit asfalt uygulamaları (örneğin; penetrasyon makadam, sathi kaplama, vb.) ile düşük trafik hacmine sahip yollar için kaplama görevi de görmektedir.

Esnek ve rijit üstyapılar, Şekil 3.1’de görüldüğü gibi trafik yükünü taban zeminine iletme yöntemleri bakımından farklılık gösterir.



Şekil 3.1. Rijit ve esnek üst yapılarda yük dağılımı

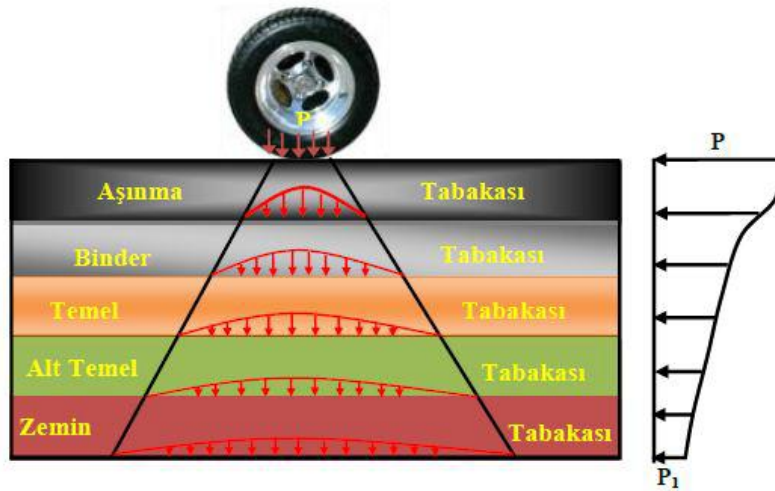
Karayollarında üstyapı çeşitli tercihi dikkat edilmesi gereken bir konudur. Tercih edilirken, üstyapı çeşitleri teknik ve ekonomik olarak kıyaslanmalı ve uygulanacağı bölge şartları da göz önünde bulundurularak, en uygun olanı seçilmelidir.

Esnek üstyapı tabakaları, düşük standartlı esnek üstyapılar (sathi kaplamalar, makadam temeller) ve yüksek standartlı esnek üstyapılar (BSK tabakaları) olarak sınıflandırılmıştır. Sathi kaplama, yolun servis ömrü süresince geçecek, tek yönde toplam standart dingil (8,2 ton) sayısı 2×10^6 dan az olan yollarda yapılmalıdır. Toplam standart dingil sayısı, 2×10^6 - 3×10^6 arasında olan yollarda ise proje ömrü kısa tutulmak şartıyla sathi kaplama yapılabilir. Proje ömrü boyunca geçecek toplam standart dingil sayısı 3×10^6 dan yüksek olan yollarda ise asfalt betonu yapılmalıdır (Sağlık ve Güngör, 2008).

3.1. Bitümlü Sıcak Karışımlar

Bitümlü sıcak karışımlar, bitüm, agrega ve havanın bulunduğu üç fazlı bir sistemden oluşmaktadır. Bu sistemde bitüm sıvı fazı, agrega katı fazı ve boşluklar gaz fazını oluştururlar. Bu sistemdeki bitüm, viskoelastik ve termoplastik bir malzemedir. Viskoelastik malzemelerde gerilme-şekil değiştirme ilişkisi yükleme zamanı ile değişmektedir. Viskoelastik malzemeler yüksek hızlı yüklemelerde yüksek mukavemet ve elastik davranış gösterirken, düşük hızlı yüklemelerde düşük mukavemet ve viskoz davranış gösterirler. Termoplastik malzemelerde ise gerilme-şekil değiştirme davranışı sıcaklıkla ilişkili olarak değişmektedir. Termoplastik malzemeler yüksek sıcaklıklarda düşük mukavemet, düşük sıcaklıklarda ise yüksek mukavemet gösterirler. Bitümün kendine has bu özellikleri, BSK'lara yansiyarak karışımın mekanik özellikleri üzerinde önemli etki yapmaktadır. BSK'ların en önemli mekanik özellikleri, rijitlik, çekme dayanımı, kalıcı deformasyonlar, tekerlek izi oluşumu ve yorulma davranışlarıdır.

Esnek yol üstyapılar farklı özelliklere sahip tabakalardan meydana gelmektedir. Şekil 3.2'de esnek üstyapıyı oluşturan katmanlar görülmektedir. Esnek kaplama tabakası, aşınma ve binder tabakası olmak üzere iki kısımdan oluşmaktadır. Binder tabakasının altında sırasıyla temel, alt temel tabakaları ve taban zemini bulunmaktadır. Aşınma tabakası, binder tabakasının üstünde bulunan ve üstyapının en üst tabakasını teşkil eden bitümlü sıcak karışım tabakasıdır. Binder tabakası, temel tabakası üstünde bulunan bitümlü sıcak karışım tabakasıdır (Çetin, 2007).



Şekil 3.2. Tipik bir yol üstyapı kesiti ve gerilme dağılımı

Kaplama tabakasının asıl görevi, taşıtlardan gelen yükleri taşımak, trafiğin aşındırma ve iklim şartlarının ayrıştırıcı etkisine karşı koymak, sürüş konforu ve su yalıtımı sağlamaktır. Şekil 3.2’de görüldüğü gibi, yol üst yapılarının en üst tabakası olan aşınma tabakası, en yüksek gerilmeye maruz kalan tabakadır. Dolayısıyla bu tabakada kullanılacak olan agregaların diğer tabakalara göre daha üstün fiziksel ve mekanik özelliklere sahip olması gerekir. Temel tabakası, alttemelin üstüne hesaplamalarla belirlenen kalınlıkta inşa edilen, belirli fiziksel donanımlara sahip malzemelerle oluşturulan iyi bir drenaj sağlamak, don etkisini azaltmak gibi görevleri olan bir üstyapı tabakasıdır. Alttemel tabakası ise, temel tabakasının üstüne yerleştirildiği bir üstyapı tabakasıdır. Temel ve alttemel tabakasının esas vazifesi, yüzeyde oluşan yükleri dağıtmak ve böylece tabanda oluşabilecek kesme ve oturma deformasyonlarını önlemektir (Orhan, 2011).

Bitümlü sıcak 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 faktörlere aşırı maruz oldukları için 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. Bu kaplamalar kalıcı deformasyona izin vermeden yükleri, alt tabakalara ve taban zeminine emniyetle intikal ettirebilmelidir (Gürer, 2005).

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 kaplama çeşiti, üretimdeki agregaya gradasyonu ve hizmet amacına bağlı olarak 4 farklı şekilde sınıflandırılmaktadır.

Açık Granülometrilik Sıcak Karışımlar: İçerik olarak ince agregası az ve boşluk yüzdesi fazladır. Poroz (geçirimli) asfalt örnek olarak verilebilir. Poroz asfalt; bitüm, çakıl ve kırılmış agregadan oluşan, içindeki boşluk yüzdesi fazla olan, yola gelen yağmur suyu

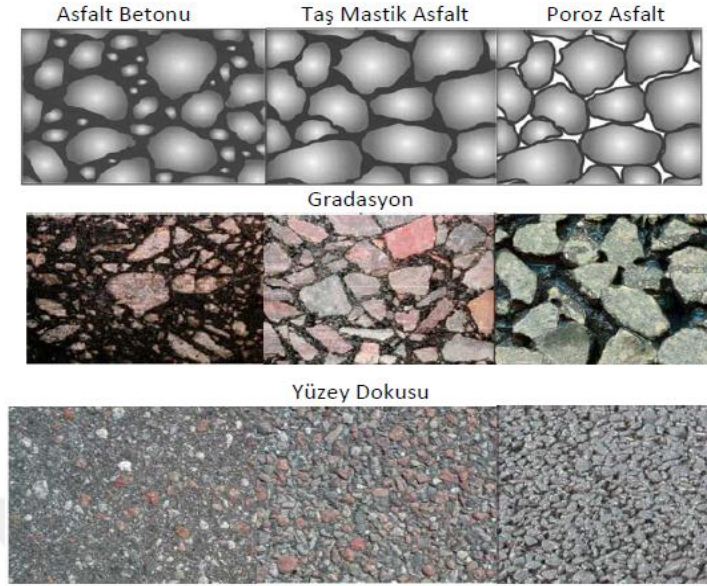
veya eriyen kar suyunun drenaj tesisine ulaştıran yada suyun taban zeminine sızmasından önce üstyapı içinde geçici olarak muhafaza edilmesine olanak veren bir kaplama türüdür. Kaplamada muhafaza edilen sular, kaplama dışına atılmaktadır. Bu tip kaplamalar üstünde su birikmediğı için, yağışlı havalarda kayma tehlikesini azalmaktadır.

Kesikli Granülometrilili Sıcak Karışımlar: Agreg a oranı belli elek aralarında fazla belli elek aralığında çok az veya hiç yoktur. Bu tür karışımlar pürüzlü bir yüzey oluştururlar. Bunlara, taş mastik asfalt (TMA) örnek olarak verilebilir. TMA, ince bir yüzey kaplamasıdır. Bu tip karışımlar, elde edilen agreg a iskelet yapısı ile yüksek mukavemetli, tekerlek izi oluşumuna karşı dirençli, uygun sıkıştırılmaları durumunda yüksek bitüm oranı nedeni ile durabiliteleri çok yüksek karışımlardır. Boşluk oranı %3-4 civarında olan TMA doğru tasarlanıp uygulandığında uzun ömürlü, dayanıklı ve stabilitesi yüksek bir kaplamadır.

Yoğun Granülometrilili Sıcak Karışımlar: Agreg a granülometrisi düşük boşluk verecek şekilde süreklilik gösterir. Bunlar boşluk oranı %2-5 arasında olan bitümlü karışımlardır. Yüzey pürüzlülüğü azdır. Bunlara, asfalt betonu, bitümlü makadam ve bitümlü temel örnek verilebilir. Asfalt betonunda, agreg a gradasyonunun sürekliliğı nedeniyle, karışımındaki mineral agregalar arasındaki boşluk değerleri az olmakta, dolayısı ile bu karışımların, ince asfalt filmi tabakası yüzünden durabiliteleri düşük olmaktadır. Ülkemizde, genel olarak kullanılan bitümlü sıcak karışım tipidir.

Harç Tipi Karışımlar: İnce agreg a miktarı fazladır ve kaba agreg a ince agregalı bitüm içinde dağılmış halde bulunmaktadır. Bu karışımlarda boşluk oranı ve pürüzlülük miktarı azdır. Bilhassa köprüler olmak üzere beton veya çelik yapılar üstüne yapılan ve neredeyse boşluksuz olan asfalt tabakasıdır. Tüm bu özellikleri onu su geçirmez yapmaktadır. Karışım 200-250°C arasındaki sıcaklıkta uygulanmaktadır. Diğer bir ismi ise mastik asfalt karışımıdır. Mastik asfalt karışımında bitüm, kaba agreg a, kum, filler ve taştozu kullanılmaktadır. Mastik karışım köprülere koruyucu tabaka olarak serilir ve böylelikle köprüde kullanılan çeliğı elverişsiz hava koşullarından muhafaza eder (Orhan, 2012).

Bu karışımlar Şekil 3.3'de görüldüğü gibi dane dağılımı, boşluk miktarı, asfalt muhtevası ve yüzey dokuları bakımından farklılık arz eder.



Şekil 3.3. Asfalt betonu, taş mastik asfalt ve poroz asfaltın yapısal farkları

3.2. Taş Mastik Asfalt Kaplamalar

Bitümlü sıcak karışım çeşitlerinden biri olan taş mastik asfalt kaplama, iri agreganın oluşturduğu bir iskelet yapı, mastik harç ve hava boşluğundan meydana gelir. İskelet yapı, yük aktarımını sağlayan uygun büyüklükteki kaba agregada daneleri kullanılarak oluşturulur. Mastik kısım, ince agregada, filler, stabilizör ve bitümlü bağlayıcıdan meydana gelir. Bağlayıcı ve filler beraberce harcı oluşturur. Uygun özellikte ve miktarda fillerin kullanımı, işlenebilirliğin; bağlayıcı kullanımı, dayanımın artmasına neden olur. İnce agreganın kullanılmasının birinci nedeni, kaba agregada daneleri arasındaki boşlukları doldurmak, ikinci nedeni ise kaba agregada danelerinin etkileşimlerine katkı sağlamaktır. TMA'da, geleneksel asfalt karışımlara nazaran daha yüksek oranda bitümlü bağlayıcı kullanılmasından dolayı, depolama, nakil, serme, sıkıştırma sırasında bitümün karışımdan süzülmesini engellemek amacıyla stabilizör (fiber, polimer vb.) kullanılır.

Almanya'da 1960'lı yılların sonunda çivili otomobil lastiklerinin geliştirilmesiyle asfalt aşınma tabakalarında meydana gelen büyük hasarlar (bir kış mevsiminde 10 mm'lik tekerlek izi derinlikleri) yeni asfalt konseptlerinin geliştirilmesine neden olmuştur.

Yüksek tekerlek izini önlemek amacıyla ilk olarak asfalt betonundan oluşan iyileştirme tabakaları uygulanmıştır. Ancak bu yöntemle istenilen başarı elde edilememiştir. Kum,

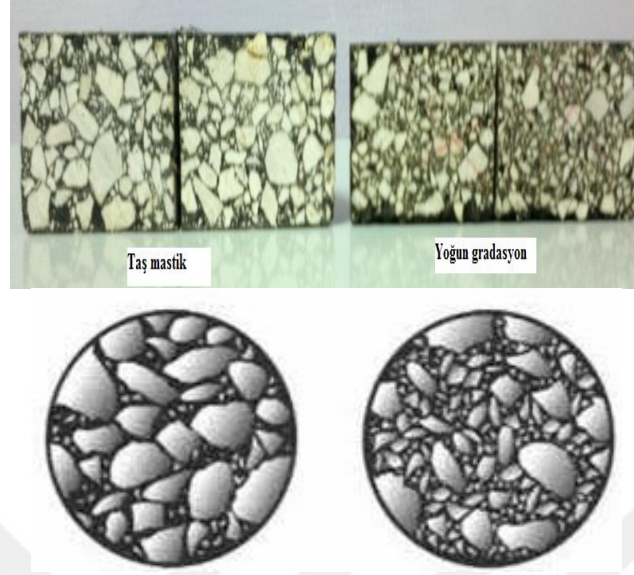
filler ve yüksek bitüm oranıyla elde edilen mastik kaplama uygulamada yerini almıştır. Hasarlı kesimler üzerine dökülen sıvı karışım üzerine kaba agregalar serpilmiş ve sıcak mastiğin içine sıkıştırılmıştır. Kullanılan bitüm ve kaba agregalar oranları bitümün agregadan süzülmesine neden olmuşsa da daha sonra kullanılan stabilize arttırıcı katkı malzemesi (elyaf) ile bu sorun çözülmüştür (Çetinkaya, 2013).

1975 yılında çivili lastikli tekerlek kullanımı yasaklanmıştır. Sonraki yıllarda ağır trafik yüküne maruz kalan yolların aşınmasında, taş mastik asfalt kaplama ve asfalt betonu kullanılmıştır. Her iki karışım türünde farklı performanslar görülmüştür. Yüksek bitüm oranlı asfalt betonda kalıcı deformasyon, düşük bitüm oranlı asfalt betonda ise yaşlanma ve çatlama gözlenmiştir. Buna karşı aynı koşullardaki TMA aşınma tabakasında söz konusu iki bozulma da gözlenmemiştir (Han vd., 2009).

Almanya’da 1984 yılında ilk defa teknik şartnamelerde yerini alan TMA, bugüne kadar birçok değişikliğe maruz kalmıştır. Bugün taş mastik asfalt kaplamalardan beklenen nitelikler TL Asphalt-StB ve ZTV Asphalt-StB 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 agregalar oranlarına üretim aşamasında dikkat edilmesi gerekmektedir. Nakliye ve serim aşamalarında asfalt betonları için de geçerli olan kalite standartlarının uygulanması büyük önem taşımaktadır. Asfalt betonlarına nispeten TMA’larda kullanılan yüksek bitüm oranları kayganlık problemi oluşturmaktadır. Bunu önlemek için de serimi takiben TMA tabakasının üzerine mıcır serpilip sıkıştırılması gerekmektedir.

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 elde edilen, boşluksuz mastik harcıyla oluşan çatlaklara, çözülmeye karşı dayanıklılık ve daha uzun servis ömrü sunan bir karışım elde edilmektedir. Bitümün süzülmesini engelleyen ve stabilizeyi arttıran elyaf katkıları, asfalt karışımının üretimi, taşınması ve serilmesi sırasında homojenliği sağlamaktadır. TMA’nın, kalıcı deformasyona karşı yüksek stabilitesi, aşınmaya karşı direnci, yavaş yaşlanması ve prematüre çatlama ve çatlama karşı durabilitesi, yüksek bağlayıcı içeriği sayesinde düşük sıcaklık performansının iyi olması, servis ömrünün uzun olması ve bakım gereğinin daha az olması avantajları arasındadır. Şekil 3.4’de taş mastik asfalt kaplama kesiti verilmiştir.



Şekil 3.4. Taş mastik asfalt kaplama kesiti

3.2.1. 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'nın iskeletini oluşturan kaba agregası granit, bazalt ve başka yüksek kaliteli magmatik kayaların kırılmasıyla elde edilmektedir. Kaba agregası olarak çakıl seçilirse, agreganın bütün yüzeyleri kırılmış olmalıdır. Taş mastik asfalt kaplamada kullanılan agregalar Tablo 3.1 ve 3.2'de belirtilen özelliklere sahip olmalıdır.

Tablo 3.1. TMA’da kullanılacak kaba agrega özellikleri (Karayolları Teknik Şartnamesi, 2013).

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, (MgSO ₄ ile kayıp), (%)	≤ 14	TS EN 1367-2
Yassılık indeksi, (%)	≤ 25	BS-812
	≤ 20 (FI20)	TS EN 933-3*
Cilalanma Değeri, (%)	≥ 50 (PSV50)	TS EN 1097-8
	≥ 40 (PSV40) binder için	
Soyulma Mukavemeti, (%) (24 saat 60°C suda bekletmeden sonra)	≥ 60	KTŞ Kısım 403 EK-A
Su Emme, (%)	$\leq 2,0$ (WA24 2)	TS EN 1097-6
Kil Topakları ve Ufalanabilir Daneler, maksimum, (%)	Bulunmayacak	TS-3526 (ASTM C-142)
* Referans metot.		
*** Parantez içindeki ifade, şartname değerinin TS EN 13043’ deki sınıfını gösterir.		

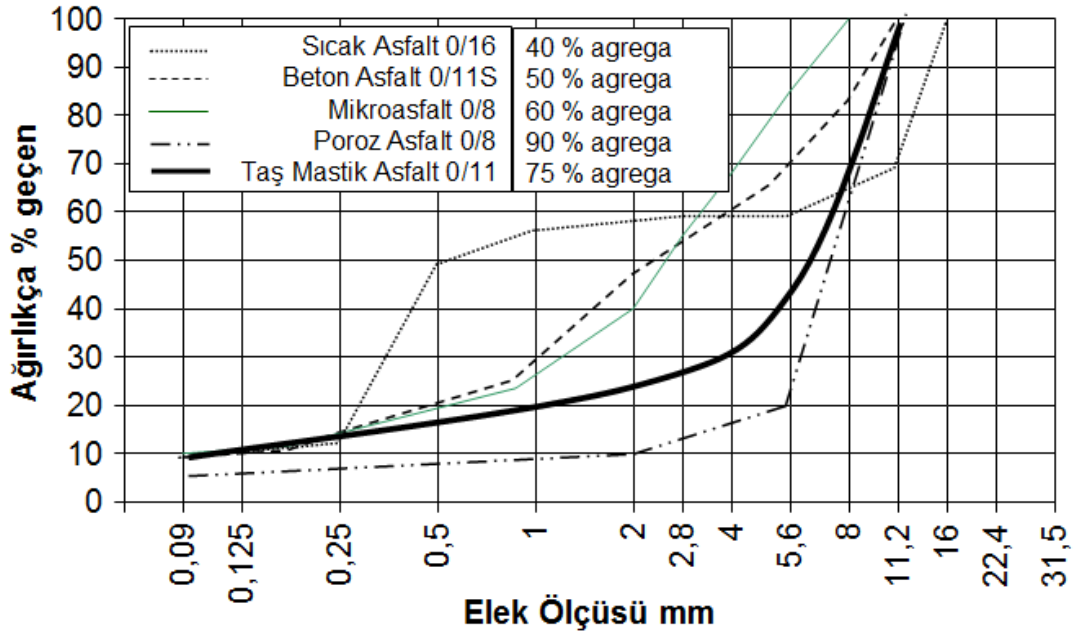
Tablo 3.2. İnce agreganın özellikleri (Kök, 2007).

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 agreganın gradasyonu Tablo 3.3'te verilmiştir. Gradasyonun filler dahil en az dört ayrı tane grubunun belli oranlarda karıştırılmasından oluşması gerekmektedir. Agregalar karıştırıldığı zaman üniform olmalıdır. Karışımın tasarım gradasyonundaki sapmalar tolerans limitleri içinde kalmalıdır. Çeşitli sıcak karışım tiplerine ve TMA'ya ait gradasyon eğrileri Şekil 3.5'te verilmiştir. Taş mastik asfaltların tasarımı laboratuvarında Marshall tasarım yöntemine göre yapılabilir. Tablo 3.4'te TMA'nın tasarım kriterleri verilmiştir.

Tablo 3.3. TMA aşınma ve binder için gradasyonu ve tolerans sınırları (Karayolları Teknik Şartnamesi, 2013).

Elek Boyutu		Aşınma TİP-1		Aşınma 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	4.75	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 3.5. Çeşitli sıcak karışımların gradasyon eğrisi

Tablo 3.4. TMA tasarım kriterleri (Karayolları Teknik Şartnamesi, 2013).

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 İzinde 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

3.2.2. Taş Mastik Asfalt Kaplamaların 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. Yüksek standartlı yol 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 boyunu 11 mm ile 8 mm arasında veya 5 mm 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,
- Daha az ses gürültüsü istenmesine karşın, büyük tane boyu daha fazla trafik sesi 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 (Blazejowski, 2010).

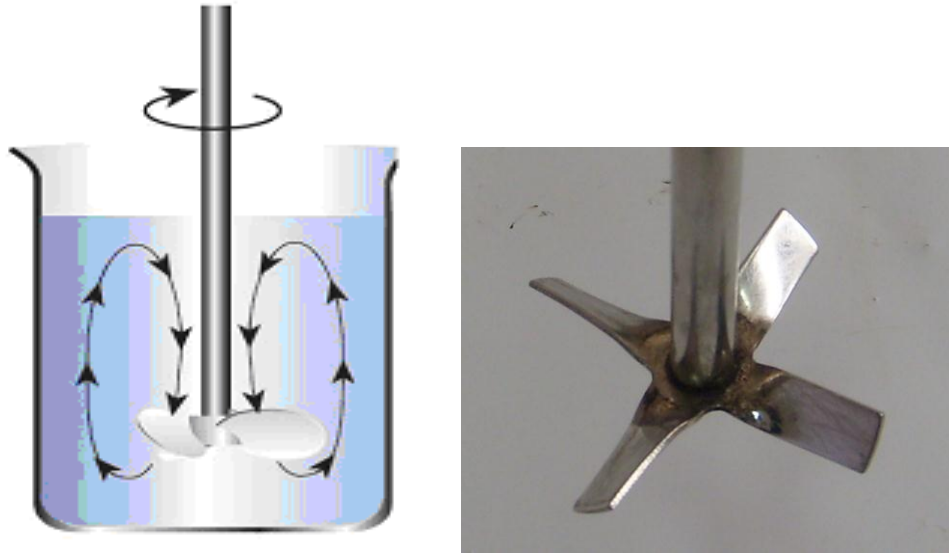
Köprülerde uygulanacak kaplamalar, soğuma ve ısınma etkilerine karşı hassastır. Örneğin, kış aylarında meydana gelen buzlanma, köprü kaplamasında toprak zemin üzerine inşa edilen asfalt kaplamadan önce hızlı ve yoğun bir şekilde kendini gösterir. Bundan dolayı köprü kaplamalarında yorulma direncine karşı yüksek dayanımlı, modifiyeli ve yüksek bağlayıcı oranına sahip mastik asfalt kullanılır. Hollanda, Danimarka ve Polonya' da ince dereceli TMA kullanılmaktadır (Yardım ve Arslan, 2013).

Son zamanlarda TMA karışımları binder tabakası olarak kullanılmaya başlanmıştır. Almanya ve ABD'de denemeleri yapılmış ve yorulma performansı açısından geleneksel karışımlara kıyasla avantajlar sağladığı belirlenmiştir. 2013 yılında Karayolları Teknik Şartnamesi yenilenmiştir ve bu yeniliklerden bir tanesi de TMA'nın binder tabakasında kullanılabilir olmasıdır.

4. TEZ ÇALIŞMASINDA KULLANILAN DENEY YÖNTEMLERİ

4.1. Modifiye Bağlayıcıların Hazırlanması

Modifiye bağlayıcının laboratuvarda hazırlanmasında Şekil 4.1’ deki etkiyi yapan karıştırma mili kullanılmıştır. Modifiyeli bitümler, saf bitüm 160°C’ye ulaştığında katkının belirlenen içerikte yavaş yavaş ilave edilip, 1000 devir/dakika hıza sahip karıştırıcıda (Şekil 4.2) 170 °C sabit sıcaklıkta 1 saat süre ile karıştırılmasıyla hazırlanmıştır. Hazırlanan modifiye bitümler oda sıcaklığına soğuduktan sonra deneylere başlanmıştır. Çalışmada grafit tozu (No.200 elekten geçen) bağlayıcı ağırlığınca %7, %10, %13 ve %16 oranlarında kullanılmıştır. Bu bağlayıcılar sırasıyla, G7, G10, G13 ve G16 olarak adlandırılmışlardır. Modifiye edilmeyen saf bağlayıcı ise G0 olarak belirtilmiştir. G0 bağlayıcısı da modifiye bağlayıcıların hazırlanma şartlarına uygun olarak 170 °C’de 1 saat karıştırılmış böylece modifiye bağlayıcıların deney sonuçlarında yaşlanmanın neden olacağı etki saf bağlayıcıda da dikkate alınmıştır.



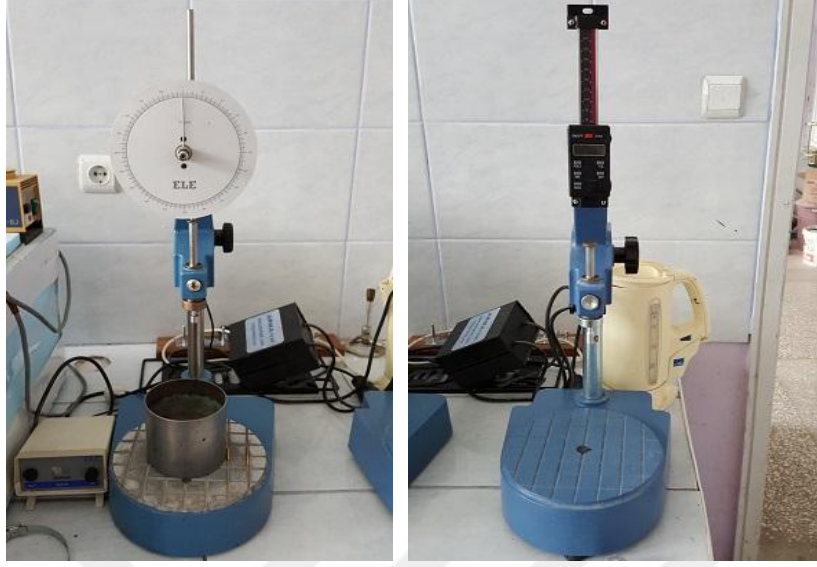
Şekil 4.1. Karıştırma mili ve etkileri.



Şekil 4.2. Modifiye bitüm karıştırma cihazı.

4.2. Penetrasyon Deneyi (EN 1426)

Penetrasyon deneyi, bitümlü bağlayıcıların sertliğini ve kıvamını belirlemek amacıyla uygulanmaktadır. Penetrasyon; standartlarda belirlenen bir iğnenin belirli yük altında, belirli bir süre içinde, belirli sıcaklıktaki bağlayıcıya dikey doğrultuda batma uzunluğudur. Penetrasyon birimi 0.01 cm'dir. Penetrasyon cihazının (Şekil 4.3) göstergesindeki her taksimat 0.1 mm'ye eşittir. Penetrasyon değeri 500'e kadar olan bitümlü bağlayıcılarda numuneye 25°C sıcaklıkta 5 saniye süre ile 100 gr'lık bir yük uygulanmaktadır. Penetrasyon değeri 500'ün üzerinde olan numuneler için deney 15°C'de yapılmakta ve yükleme şartları değişmektedir.



Şekil 4.3. Penetrasyon deney aleti

Penetrasyon deneyine tabi tutulacak bitümlü bağlayıcı numunesi EN 58'e göre alınır. Alınan numune yumuşama noktası sıcaklığını geçmeyecek kadar ısıtılıp (Maks. 90°C), kap içerisinde hava kabarcığı kalmayacak şekilde iyice karıştırıldıktan sonra numune kabına aktarılır. Numune, iğnenin tahmin edilen batma miktarından en az 10 mm daha fazla olacak şekilde numune kabına doldurulmalıdır. Numuneler 5-30°C ortam sıcaklığı olan bir yerde soğumaya bırakılır. Soğutma süresi, hacmi 180 cm³'e kadar olan numunelerden derinliği 44 mm'ye kadar olan numuneler için 60-90 dakika, derinliği 45-60 mm arasında olan numuneler için 90-120 dakika arasındadır. Hacmi 180 cm³'ten fazla olan numunelerin soğutma süresi ise her 100 cm³ için 60-90 dakika arasında olmalıdır. Daha sonra numune kapları aktarma kabının içine konularak sabit sıcaklıktaki su banyosuna yerleştirilir ve 1-1.5 saat bekletilir.

Numune üzerinde kabın kenarına ve birbirine 1 cm'den daha yakın olmayan noktalardan en az 3 deneme yapılmalıdır. Bu denemeler 2 dakika içinde yapılamaz ise numune ve aktarma kabı yeniden su banyosuna konulur ve ölçümler yeniden yapılır. İğne her deneyden önce temizlenmelidir. Denemelerin geçerli olabilmesi için penetrasyon değerleri arasında olabilecek en büyük fark Tablo 4.1'de verilen değerleri aşmamalıdır.

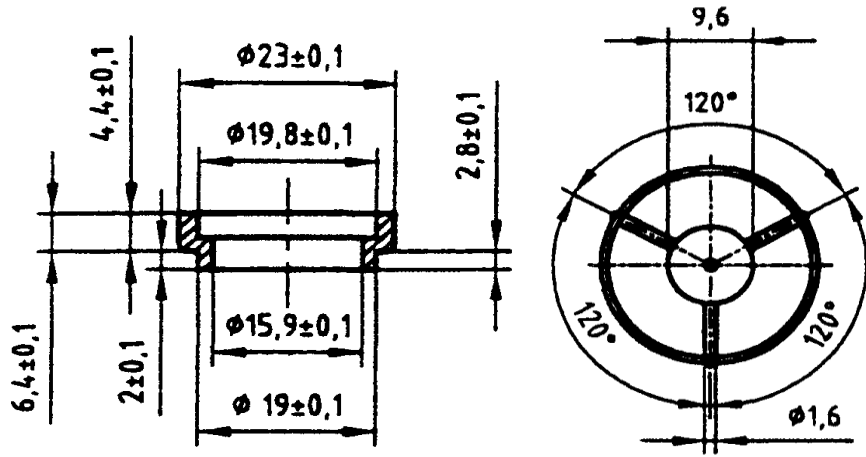
Tablo 4.1. Penetrasyon değerleri arasında olabilecek en büyük farklar

Penetrasyon değeri	≤ 49	50-149	150-249	≥ 250
Maks. penetrasyon farkı	2	4	6	8

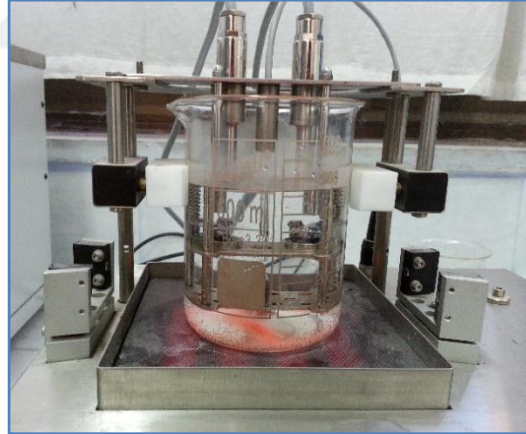
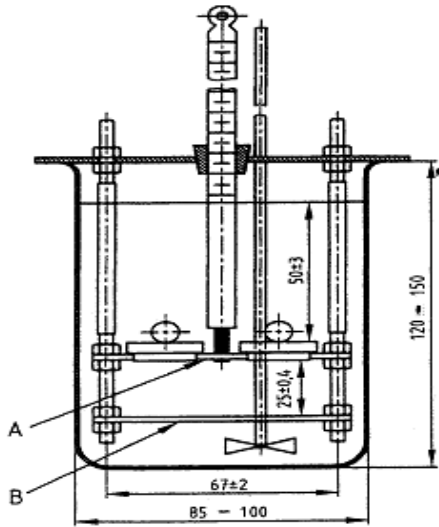
En büyük fark değerinin aşılması durumunda ikinci bir numune ile deney tekrarlanır. Yapılan deneylerden sonuç elde edilemez ise sonuçlar dikkate alınmayıp atılır. Aynı deney numunesi ile 3 geçerli ölçüm elde edilinceye kadar deneyler tekrar edilir. Kabul edilebilir ölçümlerin aritmetik ortalaması en yakın tam sayıya yuvarlatılır ve bu değer penetrasyon değeri olarak kabul edilir.

4.3. Yumuşama Noktası Deneyi (EN 1427)

Yumuşama noktası deneyi, asfalt çimentolarının sıcaklığa karşı duyarlılığını ölçmek için yapılan bir deneydir. Yumuşama noktası; bir su banyosu içine yerleştirilmiş, üzerinde bir bilye bulunan, standart halka içerisindeki bitümlü maddenin belli bir hızla ısıtılmasıyla, yumuşayan malzemenin tabana değdiği anda termometreden okunan sıcaklıktır. Deneyde pirinçten yapılmış 2 adet standart halka, 2 adet standart çelik bilye, iç çapı 8,5 cm ve yüksekliği 12 cm'den küçük olmayan ısıya dayanıklı 600 veya 800 cm³'lük bir cam beher ve termometre kullanılmaktadır. Deneyde kullanılan standart halka ve bilyelerin boyutları Şekil 4.4' de, deney düzeneği Şekil 4.5'de görülmektedir. Çelik bilyenin çapı $9,5 \pm 0,05$ mm ve kütlesi $3,5 \pm 0,05$ gr olmalıdır. Deneyde kullanılan termometre, en az 0,2°C taksimatlı ve -2°C /+80°C aralığında olmalıdır.



Şekil 4.4. Yumuşama noktası halka ve bilye boyutları



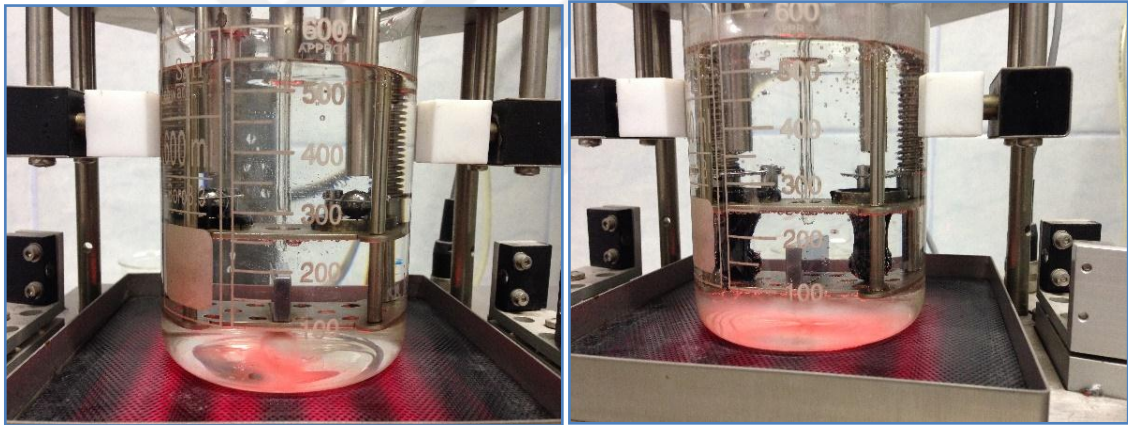
Şekil 4.5. Yumuşama noktası deney düzeneği

Deney, yumuşama noktası 80°C 'nin altında ve üstünde olan bitümlü malzemeler için farklı şekillerde yapılmaktadır:

a) Yumuşama noktası 80°C veya daha aşağı olan bitümlü malzemelerde deneyin yapılışı:

Cam kaba 8,25 cm (3,25 inç)'lik yüksekliğe ulaşacak şekilde 5°C sıcaklığa sahip saf su konur. İçinde numune bulunan halka suyun içine sarkıtılır. Halkanın alt yüzü cam kabın

dibinden 2,54 cm (1 inç) yukarıda, üst yüzey ise su seviyesinden 5,08 cm (2 inç) aşağıda bulunacak şekilde ayarlanır. Daha sonra bilye su dolu beher içine konulur. -2 ile 80°C arasında bölmelenmiş termometre, cıva haznesinin ucu halkanın alt yüzü ile aynı düzeyde ve halkadan 0,5 cm uzaklıkta bulunacak şekilde su banyosuna sarkıtılır. Su banyosunun sıcaklığı 15 dakika süreyle 5°C'de sabit tutulur. Sonra bilye, uygun bir maşa yardımıyla halka içindeki numunenin tam ortasına yerleştirilir. Su sıcaklığı dakikada 5°C artacak şekilde beher ısıtılmaya başlanır. Deneyin ilk 3 dakikadan sonraki en fazla 1 dakika aralıkta müsaade edilen sıcaklık yükselme hızındaki sapma en fazla 0,5°C olmalıdır. Sıcaklığın artması ile yumuşayan malzemenin banyonun tabanına değdiği anda termometreden okunan sıcaklık yumuşama noktası olarak kaydedilir (Şekil 4.6).



Şekil 4.6. Yumuşama noktası deneyinin öncesi ve bilyelerin düşmesi ile deneyin bitişi

b) Yumuşama noktası 80°C'den yüksek olan bitümlü malzemelerde deneyin yapılışı:

Deney yine yukarıda anlatılan şekilde yapılır, ancak saf su yerine gliserin kullanılır. Saf su yerine gliserin kullanılması durumunda başlangıç sıcaklığı $30 \pm 0.5^\circ\text{C}$ olmalı ve kullanılacak termometre 30-200°C arasında bölmelenmiş olmalıdır.

Yumuşama noktası tayini iki numune üzerinde yapılmalı ve sonuç olarak bu iki değerin ortalaması verilmelidir. İki bilyeden her biri için elde edilen sıcaklıklar arasındaki fark, yumuşama noktası 80°C'nin altında olan numuneler için 1°C'yi, 80°C'nin üzerinde olan numuneler için ise 2°C'yi geçerse deneyler tekrar edilmelidir.

Bitümün ısıya karşı duyarlılığı, karışımın hazırlanması esnasında enerji ve süre açısından, uygulamada ise karışımların düşük sıcaklıklarda ısıl çatlak oluşumu ve yüksek sıcaklıklarda kalıcı deformasyon oluşumu açısından büyük önem teşkil etmektedir. Isı hassasiyeti düşük bağlayıcılar karışımın hazırlanması esnasında bir takım olumsuzluklara sebep olmasına rağmen karışımın performansının sonuç olarak artmasını sağlamaktadır. Bitümün ısıya karşı duyarlılığını belirlemek amacıyla yumuşama noktası ve penetrasyon deneylerinin sonuçları göz önünde bulundurularak (4.1) ve (4.2) bağıntıları kullanılarak Penetrasyon İndeksi (PI) değeri hesaplanmaktadır.

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

$$PI = (20 - 500A) / (1 + 50A) \quad (4.2)$$

Formüldeki P_{25} , bitümün 25°C'deki penetrasyon değerini, T_{YN} ise yumuşama noktası sıcaklığını göstermektedir. Bitümün ısıya karşı duyarlılıkları arttıkça penetrasyon indeksi değeri azalmaktadır.

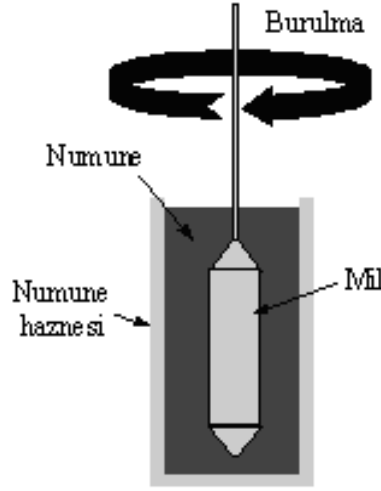
4.4. Dönel Viskozimetre (RV) Deneyi (ASTM D 4402)

Dönel viskozimetre deneyi, asfalt bağlayıcının sıcak karışım tesisinde ne derece işlenebilirlik ve pompalanabilirliğe sahip olacağının tespiti için yüksek sıcaklıklardaki akıcılığının ölçülmesinde kullanılmaktadır. Bağlayıcı viskozitesinin ölçüm yöntemi, ASTM D 4402 standardında açıklanmış ve detaylandırılmıştır (Altaş, 2002; Zaniwski ve Pumphrey, 2004; Gennis vd., 1994).

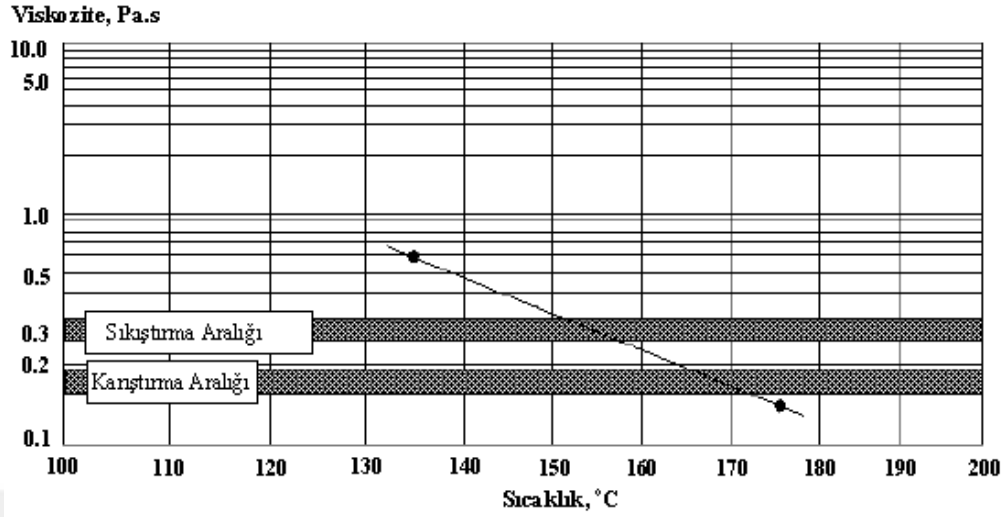
Viskozite değeri, bitümlü bağlayıcının pompalama ve karıştırma sırasında yeterli derecede akışkan olup olmadığını tespit etmek amacıyla belirlendiğinden, dönel viskozimetre deneyi yaşlandırılmamış saf ve modifiye edilmiş bağlayıcılar üzerinde uygulanmaktadır. Superpave şartnamesine göre bağlayıcı sınıflandırmasında, Pascal-saniye (Pa.s) birimi kullanılmakta ve bağlayıcının 135°C sıcaklıkta ölçülen dönel viskozite değerinin 3 Pa.s'yi (3000 cP) aşmaması istenmektedir (Altaş, 2002; Zaniwski ve

Pumphrey, 2004). Dönel viskozite değeri, silindirik bir milin sabit bir sıcaklıkta asfalt bağlayıcı numunesi içinde kendi etrafında dönüş hızını sabit tutacak burulma kuvvetinin ölçülmesi ile belirlenmektedir (Şekil 4.7). Bu burulma kuvveti, viskozimetre tarafından belirlenen bağlayıcı viskozitesi ile doğrudan ilişkilidir (Gennis vd., 1994).

Viskozimetre ayrıca karışım tasarımında kullanılacak karıştırma ve sıkıştırma sıcaklık aralıklarının tespitinde kullanılan sıcaklık-viskozite grafiğinin hazırlanmasına yardımcı olmaktadır. Bağlayıcıların karıştırma ve sıkıştırma sıcaklık aralıkları, Şekil 4.8’de tipik bir örneği verilen bu grafikler yardımıyla tespit edilmektedir. Dönel viskozimetre deneyi ile asfalt bağlayıcıların viskozitesi 0,01 Pa.s ile 200 Pa.s arasında ölçülebilmektedir (Zaniewski ve Pumphrey, 2004; Petersen vd., 1994).

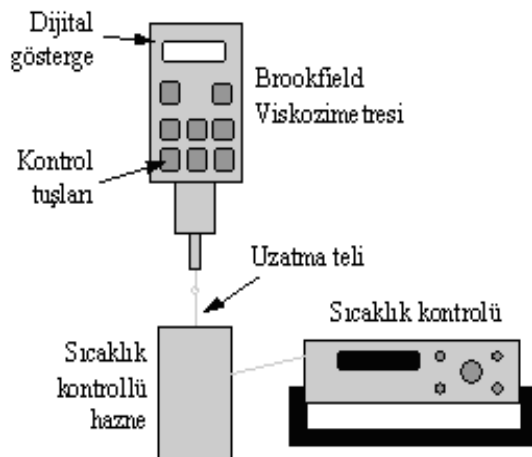


Şekil 4.7. Dönel viskozimetre (RV) deney şeması



Şekil 4.8. Asfalt bağlayıcı için tipik viskozite eğrisi

Dönel viskozimetre, Şekil 4.9’da şematik olarak gösterildiği gibi Brookfield viskozimetre aleti ve termosel sistem olmak üzere başlıca iki ana üniteden oluşmaktadır. Viskozimetre; motor, mil, kontrol paneli ve dijital göstergedan oluşmaktadır. Motor, milin kendi etrafında dönmesini sağlayan burulma kuvvetini üretmektedir. Silindirik mil 20 devir/dakika (20 rpm) hızla döndürülürken, viskozluk değeri sistem tarafından otomatik olarak saptanmaktadır (Zaniewski ve Pumphrey, 2004; Gennis vd., 1994; Petersen vd., 1994).



Şekil 4.9. Brookfield viskozimetresi ve termosel sistem

Bitümlü bağlayıcıların çoğu 100°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda Newton sıvısı şeklinde davranış göstermektedir (Bahia ve Anderson, 1995). Newton sıvısı, viskozitenin kayma deformasyonu oranından bağımsız olduğu, tamamen viskoz davranışla karakterize edilmektedir. Bitümlü bağlayıcılar yüksek sıcaklıklarda tamamen viskoz davranış sergilediklerinden karıştırma ve sıkıştırma sırasında bağlayıcının işlenebilirliğinin karakterize edilmesinde viskozite ölçümü yeterli gelmektedir (Zaniewski ve Pumphrey, 2004).

RV deneyinde, kayma gerilmesi (τ) ile burulma (M) ve kayma oranı ($\dot{\gamma}$) ile açısal hız (ω) arasındaki ilişkiler aşağıdaki bağıntılarla ifade edilmiştir.

$$\text{Kayma oranı (s}^{-1}\text{); } \dot{\gamma} = \omega \left[\frac{2R_c^2}{(R_c^2 - R_s^2)} \right] \quad (4.3)$$

$$\text{Kayma Gerilmesi (din/cm}^2\text{); } \tau = \frac{M}{2\pi R_s^2 L} \quad (4.4)$$

Burada;

ω : Sabit mil hızı (rad/s),

R_c : Numune kabının çapı (1,9525 cm),

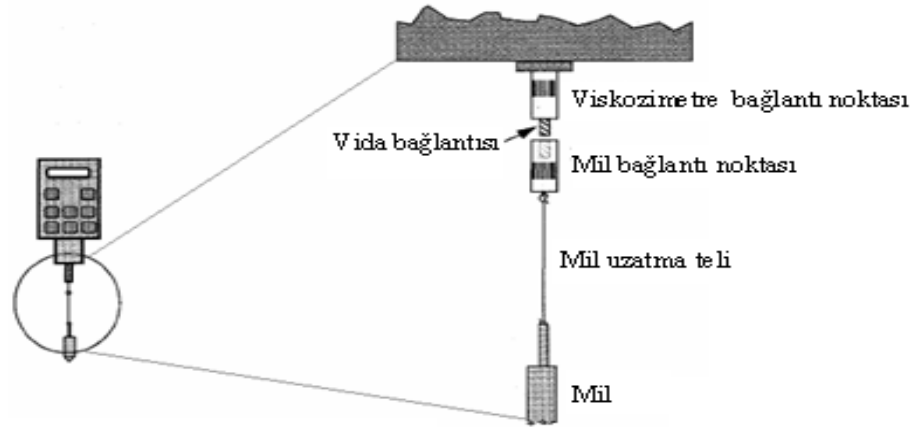
R_s : Milin çapı (No:27 için 1,176 cm),

M: Uygulanan burulma (din.cm),

L: Milin efektif uzunluğu (No:27 için 3,302 cm)'dur.

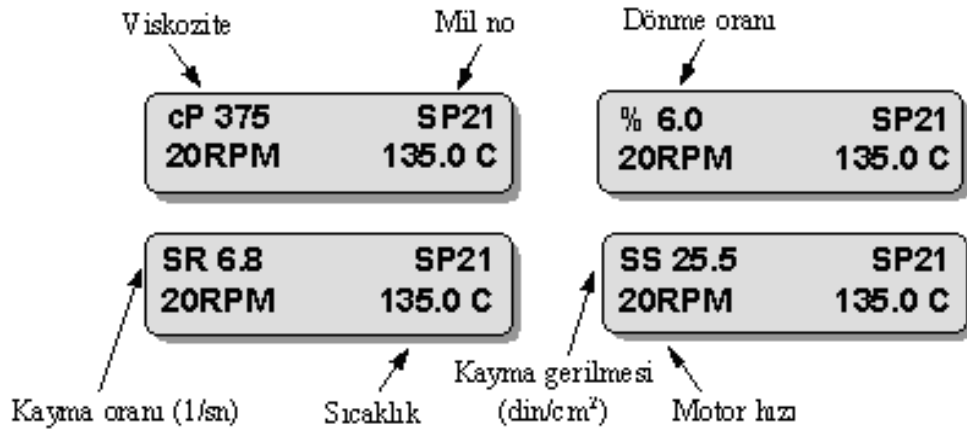
Asfaltın viskozite değeri santipois (cP) olarak aşağıdaki bağıntı yardımıyla belirlenmektedir.

$$\mu = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (4.5)$$



Şekil 4.10. Viskozimetre ve mil bağlantısı

Deney boyunca viskozimetre dijital ekranında Şekil 4.11’de görülen deney bilgileri verilmektedir. Burada sadece dijital göstergenin sol üst köşesindeki değerler deney esnasında değişmektedir.



Şekil 4.11. Dönel viskozimetre (RV) göstergesi

Karıştırma ve sıkıştırma sırasında, işlenebilirlik bakımından gerekli viskozite değerlerini sağlayan sıcaklık aralıklarının belirlenebilmesi için dönel viskozimetre deneyinin iki farklı sıcaklıkta yapılması gerekmektedir. Farklı iki sıcaklıkta belirlenen viskozite değerleri viskozite-sıcaklık grafiğinde işaretlenerek karıştırma ve sıkıştırma için

tavsiye edilen viskozite değerlerini sağlayacak sıcaklık aralıkları belirlenmektedir (Zaniewski ve Pumphrey, 2004; Petersen vd., 1994; Yildirim vd., 2000).

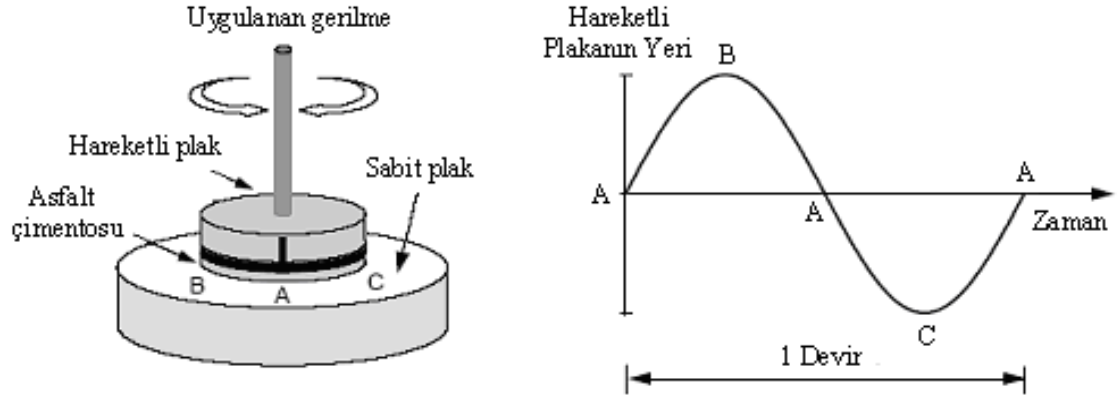
4.5. Dinamik Kayma Reometresi (DSR) Deneyi (AASHTO TP5)

Bağlayıcının davranışı y¼kleme süresi ve sıcaklığa bağlı olduğundan, SHRP tarafından geliştirilen DSR deneyi ile bağlayıcının orta ve yüksek sıcaklıklardaki reolojik özellikleri (kompleks kayma mod¼lü, faz açısı vb.) karakterize edilmektedir (Zaniewski ve Pumphrey, 2004; Gennis vd., 1994).

DSR deneyi ile bit¼ml¼ bağlayıcının yolun yapımından hemen sonraki tekerlek izine karşı dayanımı belirlenmekte ve ömr¼n¼n ilk dönemleri için yüksek servis sıcaklıklarında kaplamanın tekerlek izi oluşumuna karşı direnci değerlendirilebilmektedir. Ayrıca, bu deney servis ömr¼n¼n ilerleyen dönemlerinde orta servis sıcaklıklarında kaplamanın yorulma çatlağı oluşumuna karşı dayanımının belirlenmesini de sağlamaktadır. DSR deneyi ile bit¼ml¼ bağlayıcının viskoelastik özellikleri, sin¼soidal y¼klemelere karşı bağlayıcı davranışının değerlendirilmesi sonucunda belirlenmektedir. Ölç¼mler, farklı sıcaklık, farklı gerilme ve deformasyon düzeyleri ve farklı test frekanslarında elde edilebilmektedir. DSR deneyinde, asfalt numunenin sin¼soidal gerilmelere veya deformasyonlara karşı davranışı belirlenerek bit¼ml¼ bağlayıcının kompleks kayma mod¼lü (kayma sertliği) (G^*) ve faz açısı (δ) hesaplanmaktadır. Viskoelastik bölgede bit¼ml¼ bağlayıcıların kayma deformasyonuna karşı dayanımının göstergeleri olan kompleks kayma mod¼lü ve faz açıları, bit¼ml¼ sıcak kaplamaların tekerlek izi oluşumunu ve yorulma çatlağı potansiyelini belirlemeye yardımcı olmaktadır (Zaniewski ve Pumphrey, 2004; Petersen vd., 1994).

Şekil 4.12 ve 4.13’de gör¼len deney aleti ve deney düzeneğinde sabit bir plaka ile dönebilen bir plaka arasına yerleştirilen sabit kalınlıktaki bit¼m numunesi belirli bir ısı altında ve belirli bir hızda döndür¼lmeye çalışılır. Hareketli plağa uygulanan gerilme veya deformasyon ile plak A noktasından B noktasına kadar hareket ettirilir. Daha sonra hareketli plak B noktasından A noktasına ve C noktasına kadar döndür¼lür. Daha sonra C noktasından tekrar A noktasına kadar döndür¼lür. Hareketli plağın bu hareketine bir devir

denilir ve bu salınım deney süresince aynı şekilde tekrar edilir (Zaniewski ve Pumphrey, 2004; Gennis vd., 1994).



Şekil 4.12. Dinamik kayma reometresi (DSR) çalışma şekli



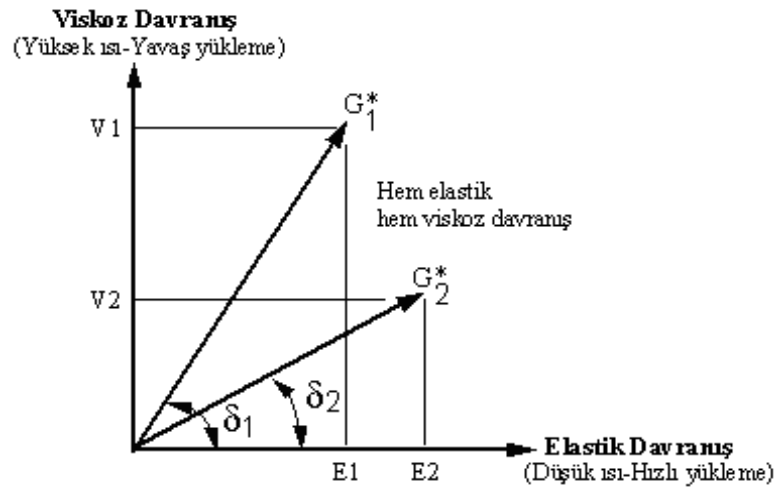
Şekil 4.13. DSR test cihazı

Bu deney, saniyede 10 radyanlık sabit bir frekansta (ω) birbirini takip eden 10 devir yapılarak gerçekleştirilmektedir. Burada, 10 rad/sn frekans değeri 100 km/saat trafik hızına eşdeğer olarak kabul edilmektedir. Şehir içi yollarda 50 km/saat trafik hızı için frekans 5 rad/sn, duran trafik için 1 rad/sn olarak alınmaktadır (Yıldırım vd., 2000). 10 rad/sn'lik sabit frekans (4.6) bağıntısı kullanıldığında yaklaşık 1,59 Hz (devir/sn) sabit frekansa (f) ve (4.7) bağıntısı kullanıldığında 0,1 sn yükleme süresine (t) eşit olmaktadır (Zaniewski ve Pumphrey, 2004). Yükleme süresi, kaplama üzerinden 50 mph hızla hareket eden bir kamyon tekerleğinin geçmesinden kaynaklanan yükleme zamanını ifade etmektedir.

$$\omega = 2\pi f \quad (4.6)$$

$$t = (2\pi f)^{-1} \quad (4.7)$$

Dinamik kayma reometresi, asfalt bağlayıcıların kompleks kayma modülü (G^*) ve faz açısını (δ) ölçmek suretiyle hem viskoz hem de elastik davranışını tanımlamak üzere kullanılmaktadır. Kayma modülü (G^*), malzemenin sürekli tekrar eden kayma gerilmelerine tabi tutulmasıyla deformasyona karşı gösterdiği toplam direncin bir ölçüsüdür. Şekil 4.13'de görüldüğü gibi elastik ve viskoz olmak üzere iki bileşeni bulunmaktadır.



Şekil 4.14. Viskoelastik davranış

Faz açısı (δ) ise viskoz ve elastik deformasyonun bağıl miktarlarının göstergesidir. Kayma modülü ve faz açısı, yükleme frekansı ve sıcaklıkla doğrudan ilişkilidir. Asfalt bağlayıcı, yüksek sıcaklıklarda viskoz bir sıvı gibi davranır ve bu durum Şekil 4.13'de düşey ekseninde temsil edilmektedir. Yani faz açısı $\delta = 90^\circ$ iken malzemenin kompleks kayma modülü (G^*) elastik bir özellik göstermez. Çok düşük sıcaklıklarda ise asfalt bağlayıcı, oluşan deformasyonların tamamen geri döndüğü elastik katılar gibi davranmaktadır. Bu durumu ise aynı grafikteki yatay eksen temsil eder ve bu da faz açısı $\delta = 0^\circ$ iken malzemenin kompleks kayma modülünün (G^*) viskoz bir özellik taşımadığı anlamına gelir (Zaniewski ve Pumphrey, 2004; Tunç, 2001).

Kompleks kayma modülü (G^*), toplam kayma gerilmesinin ($\tau_{maks}-\tau_{min}$), toplam deformasyona ($\gamma_{maks}-\gamma_{min}$) oranı olarak (4.8) bağıntısı ile elde edilmektedir.

$$G^* = \frac{|\tau_{maks} - \tau_{min}|}{|\gamma_{maks} - \gamma_{min}|} \quad (4.8)$$

DSR deneyinde deney sıcaklık aralığı, asfalt bağlayıcının performans seviyesine bağlı olarak 46°C ile 82°C arasında değişmektedir. Yorulma ömrünü değerlendirmek amacıyla PAV'da yaşlandırılmış bağlayıcılar için bu sıcaklık aralığı 4°C ile 40°C arasında değişmektedir. Deneyin gerilme veya deformasyon kontrollü yapılmasına bağlı olarak kayma gerilmesi veya kayma deformasyonu değeri hedef verisi olarak bilgisayara girilmelidir (Zaniewski ve Pumphrey, 2004; Gennis vd., 1994). Bağlayıcının yaşlanma durumuna göre bilgisayara girilen bu değerler Tablo 4.2'de verilmiştir.

Tablo 4.2. Hedeflenen kayma gerilmesi ve deformasyon değerleri

Bağlayıcı Çeşidi	Hedef Kayma Deformasyonu (%)	Hedef Kayma Gerilmesi (kPa)
İşlem görmemiş	12	1,0
RTFOT'ta yaşlandırılmış	10	2,2
PAV'da yaşlandırılmış	1	5000

4.5. Kiriş Eğme Reometresi (BBR) Deneyi (AASHTO TP1)

Soğuk iklimli bölgelerde yapılan esnek kaplamalarda, yüke bağlı olmayan ancak iklim ve çevre şartlarından kaynaklanan ve termal çatlak olarak da isimlendirilen düşük sıcaklık çatlakları oluşmaktadır. Asfalt bağlayıcılar düşük sıcaklıklarda rijit davranış gösterdiğinden kaplamanın da rijit davranmasına sebep olurlar ve bu davranış, kaplamanın termal çatlak riskini arttırmaktadır. Bu sebeple SHRP tarafından, asfaltın düşük sıcaklıklardaki davranışının gözlenmesi amacıyla kiriş eğme reometresi (BBR) deneyi geliştirilmiştir. Bu deney, belirli ısıda ve sabit bir yük altında asfalt bağlayıcının ne kadar sünme veya defleksiyon yapacağını ölçmekten ibarettir ve bu nedenle asfalt kaplamanın karşılaşılabileceği en düşük sıcaklıklarda sahip olabileceği elastik davranışını belirlemeye çalışır (Zaniewski ve Pumphrey, 2004; McGennis vd., 1994; Loh ve Olek, 1999). BBR deney aleti Şekil 4.15’de görülmektedir.

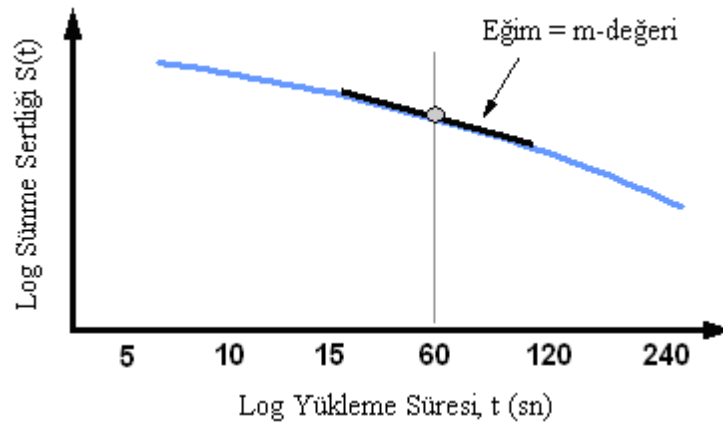


Şekil 4.15. BBR test cihazı

BBR deneyinde, asfalt numunenin yük altındaki sertliğinin tespit edilmesinde kiriş teorisi kullanılmaktadır. Standart ölçülerdeki kiriş şeklindeki asfalt çubuğa sabit bir tekil kuvvet 100 ± 5 gr (980 ± 5 mN) uygulanır ve 240 saniyelik deney süresi boyunca çubuğun ortasında oluşan defleksiyon farklı sürelerde (8, 15, 30, 60, 120, 240 sn) sistem tarafından

ölçülerek sünme sertliği (S) ve sünme oranı (m-değer) hesaplanır. Deney sırasındaki yükleme, çok düşük sıcaklıklarda kaplamanın yavaş yavaş maruz kaldığı termal gerilmeleri temsil etmektedir. Sünme sertliği (S), asfaltın sünme gerilmelerine karşı gösterdiği direnç ve sünme oranı (m-değer) ise yükleme süresince asfaltın sertliğindeki değişim olarak değerlendirilmektedir.

Deney sonucunda elde edilen ikinci parametre olan sünme oranı (m-değer), zamana bağlı olarak $S(t)$ değerinin değişimini ifade etmektedir. Bu değer bilgisayar yazılımı tarafından otomatik olarak hesaplanır. Bu değeri elde etmek için, farklı yükleme zamanlarındaki sertlik ölçülerek elde edilen sertlik-zaman eğrisinde belirli bir andaki teğetin eğimi sünme oranı (m-değer) olarak alınmaktadır (Şekil 4.16). AASHTO SP1 standardına göre 60 sn yükleme süresi için sünme sertlik değerinin maksimum 300 Mpa ve sünme oranı değerinin ise minimum 0,300 olması gerekmektedir (Kennedy vd., 1994; Zaniwski ve Pumphrey, 2004; McGennis vd., 1994; Petersen vd., 1994).

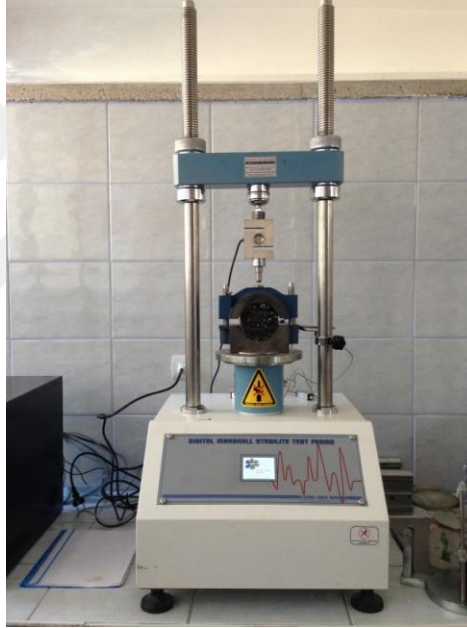


Şekil 4.16. Sünme oranının belirlenmesi

4.6. Marshall Stabilite ve Akma Deneyi

BSK numuneleri üzerinde Marshall stabilite ve akma deneyi TS EN 12697-34, 2007 standardına göre uygulanmıştır. Stabilite; deformasyona karşı maksimum dayanım olarak, akma ise maksimum yüke ulaşıldığı anda numunede meydana gelen düşey deformasyon

olarak standartta tanımlanmaktadır. Standartta 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 ortalananacak biçimde yerleştirilmekte ve numuneye 50 ± 2 mm/dakika hızla yükleme yapılmaktadır. Marshall deney düzeneği Şekil 4.17’de görülmektedir.



Şekil 4.17. Marshall stabilite ve akma aleti

Deneyde, maksimum yük ve maksimum yüke ulaşıldığı anda deformasyon değerleri kaydedilmektedir. Numunenin sudan çıkmasından itibaren 40 sn içerisinde deney bitirilmelidir. Deneyde standart numune yüksekliğinin 63,5 mm. olduğu kabul edilmektedir. Farklı yüksekliklere sahip numuneler için stabilite düzeltme katsayıları aşağıdaki (4.9) bağıntısı yardımıyla tespit edilmektedir.

$$c = 5,24 \times e^{(-0,0258 \times h)} \quad (4.9)$$

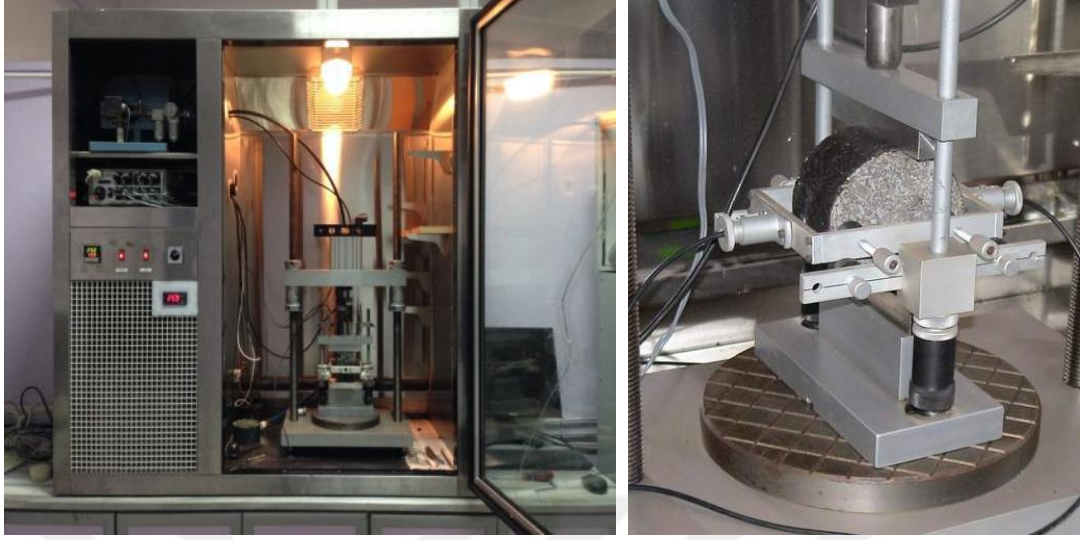
Burada c , düzeltme katsayısı, h ise mm olarak numune yüksekliğidir. Elde edilen stabilite ve akma değerlerinin ortalaması alınmaktadır. Bu sayede stabilite ve akma değerleri belirlenmektedir. Stabilite ortalamasından %15 farklı stabilite değerine sahip olan numuneler ve akma ortalamasından %20 farklı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

Marshall stabilitesi değerinin akma değerine bölünmesi ile Marshall oranı (MQ) belirlenmektedir. Marshall oranı, karışımın sertliğinin ve asfalt betonunun deformasyona karşı direncinin bir göstergesidir (Zoorob ve Suparma, 2000; Hınıslioğlu ve Ağar, 2004; Çolak, 2006; Yılmaz ve Kök, 2008).

Bitümlü sıcak karışımların nem hasarına karşı dayanımlarını belirlemek amacıyla uygulanan deney yöntemlerinden biri Kalıcı Marshall Stabilitesi yöntemidir. Kalıcı Marshall Stabilitesi yönteminde numuneler $60 \pm 1^\circ\text{C}$ sıcaklığa sahip su banyosunda 24 saat bekletildikten sonra Marshall deneyine tabi tutulmaktadır (Aksoy vd., 2005; URL-1, 2013). 24 saat 60°C suda bekletilen numunelerin Marshall değerinin normal Marshall değerine oranlanması ile Kalıcı Marshall Stabilitesi belirlenmektedir. Kalıcı Marshall Stabilitesi değerinin yüksek olması bitümlü sıcak karışımların nem hasarına karşı dayanımlarının da yüksek olacağını göstermektedir.

4.7. İndirek Çekme Rijitlik Modülü Deneyi

Bitümlü tabakaların yük dağıtma kabiliyetinin bir ölçüsü olan rijitlik modülü, bitümlü sıcak karışımların en önemli performans karakteristiklerinden biridir (Zoorob ve Suparma, 2000). BS DD 213 standardı ile tanımlanmış hasarsız ve deformasyon kontrollü bir deney olan indirekt çekme rijitlik modülü (ITSM) deneyi UMATTA (Universal Material Testing Apparatus) deney aleti kullanılarak yapılmaktadır (Şekil 4.18).



Şekil 4.18. UMATTA cihazı ve ITSM deney düzeneği

Deney sistemi; iklimlendirme kabini, yükleme çerçevesi, yazılım ve bilgisayardan oluşmaktadır. Standart deney sıcaklığı 20°C olmasına rağmen iklimlendirme kabini sayesinde deney farklı sıcaklıklarda yapılabilmektedir. Deney öncesinde numuneler en az 3 saat deney sıcaklığında bekletilmektedir. Numune yüksekliği, çapı, tahmini poisson oranı, hedef yatay deformasyon, yük etki süresi ve yük artış süreleri, tahmini rijitlik modülü gibi değerler önceden yazılıma girilmektedir. Daha sonra numune yükleme çerçevesine yerleştirilerek yatay deformasyonu ölçen sensörler ayarlanmaktadır. Deneyde, önce numunelere ön yükleme işlemi uygulanmaktadır. 5 defa tekrarlanan ön yükleme sırasında cihaz otomatik olarak numunede yatay ekseninde hedef deformasyonu meydana getirecek yükü belirlemektedir. Ardından numuneye ön yükleme ile belirlenen yükte uygulanan 5 darbe sonucu bağıntı (4.10) kullanılarak ITSM değerleri belirlenmektedir.

$$S_m = \frac{F(R+0,27)}{LH} \quad (4.10)$$

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

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

4.8. İndirek Çekme Yorulma Deneyi

Karayollarında kullanılan bitümlü malzemeler, her bir taşıt geçişinde kısa süreli bir yüke maruz kalmaktadır. Bu yükler, malzemenin rijitliğinin azalmasına neden olan mikro hasarlara yol açmaktadır. Bu mikro hasarlar uzun dönemde yorulma çatlakları olarak adlandırılan kaplama bozulmalarına neden olmaktadır (Francken, 1998). Yorulma çatlakları, bitümlü sıcak karışımlarda en fazla görülen ve yükten kaynaklanan bozulma türüdür. Yorulma çatlakları, tekrar eden yükler sonucu çatlak oluşumunu takiben kademeli olarak artmaktadır (Kök, 2007). Pratikte yorulmadan kaynaklanan bozulma kaplamanın belirli bir oranda yorulma çatlakları ile kaplanması şeklinde tanımlanmaktadır.

İndirekt çekme yorulma deneyinde (İÇYD), numune kırılıncaya kadar etki eden yük tekrerrür sayısı belirlenmektedir. Her bir numune türü değişik gerilme seviyelerinde yorulma deneyine tabi tutularak farklı gerilme seviyelerindeki kırılmaya neden olan yük tekrerrür sayıları belirlenmektedir. Böylece yorulma ömrü (N_f) ile gerilme (σ) arasındaki klasik yorulma ilişkisi logaritmik ölçekte çizilen grafikten veya aşağıdaki Wöhler (4.11) bağıntısından yararlanılarak belirlenmektedir.

$$N_f = k_1 \times \left(\frac{1}{\sigma}\right)^{k_2} \quad (4.11)$$

Burada; N_f , yorulma ömrünü ifade eden yük tekrerrür sayısını, k_1 ve k_2 malzeme karakteristiklerini, σ uygulanan gerilmeyi (kPa) ifade etmektedir (Molenaar ve Medani, 2000). Yorulma denklemlerinden elde edilen k_1 ve k_2 katsayıları, karışımların yorulma karakteristikleri üzerinde katkı maddelerinin etkilerinin belirlenmesinde kullanılabilir. Üstel katsayı olan k_2 'nin büyük olması yorulma çizgisi eğiminin daha fazla yatık olduğunu göstermektedir. Karşılaştırılan iki karışımın k_1 değerlerinin aynı olması durumunda k_2 katsayısı yüksek olan karışımın yorulma ömrü daha uzun olmaktadır.

Diğer taraftan k_2 değerlerinin eşit olması, karışımların yorulma ömrü eğrilerinin birbirine paralel olduğunu göstermekte olup daha düşük k_1 değerine sahip karışımın yorulma ömrü daha düşük olacaktır (Simms, 1998).

İndirekt çekme yorulma deneyinin basit olması ayrıca geometrisi nedeniyle numunelerin laboratuvar ortamı yada araziden rahatlıkla temin edilebilmesi bu deney yöntemini en fazla tercih edilen deneylerden biri haline getirmiştir. 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 orta kısmında yarılma meydana gelmesine neden olmaktadır.

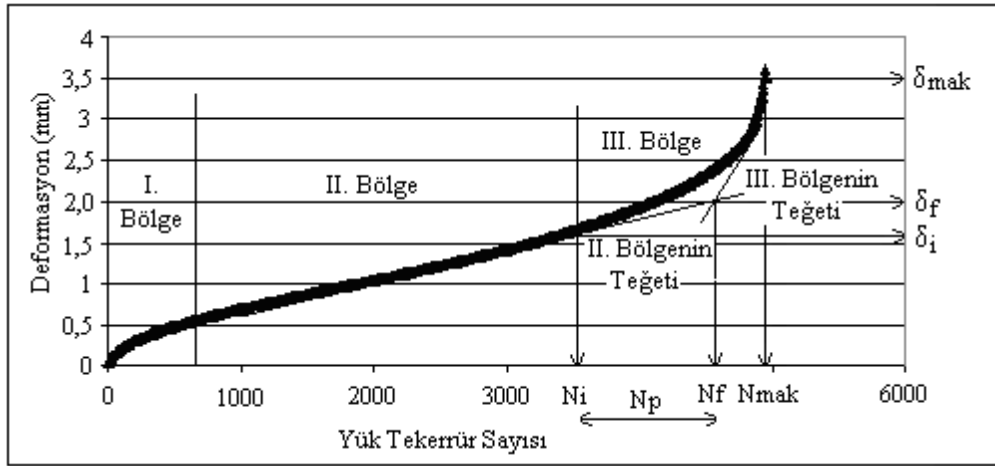


Şekil 4.19. Yorulma deney düzeneği

Gerilme kontrollü indirekt çekme yorulma deneyi (İÇYD), UMATTA deney aleti kullanılarak yapılmaktadır. Şekil 4.19’da deney düzeneği görülmektedir. ITSM deneyinde olduğu gibi deney sistemi; iklimlendirme kabini, yükleme çerçevesi, yazılım ve bilgisayardan oluşmaktadır. Standart deney sıcaklığı 25°C olmasına rağmen iklimlendirme kabini sayesinde deney farklı sıcaklıklarda yapılabilir. Deney öncesinde numuneler, en az 3 saat deney sıcaklığında bekletilmektedir. Numune yüksekliği, çapı, uygulanacak

gerilme yük periyodu ve yük artış süreleri gibi değerler önceden yazılıma girilmektedir. Numune, yükleme çerçevesine yerleştirilmekte, düşey deformasyonu okuyacak doğrusal değişken türevsel dönüştürücüler (LVDT) ayarlanmakta ve deneye başlanmaktadır. Deney, numuneler tam olarak kırılıncaya kadar devam etmektedir.

Gerilme kontrollü olarak yapılan yorulma deneyi sonucunda Şekil 4.20’de temsili olarak görüldüğü gibi yük tekerrür sayısı-deformasyon miktarı grafiği çizilebilmektedir. Yorulma ömrü, bazı araştırmacılar tarafından deformasyon - yük tekerrür sayısı grafiğinde eğimin önemli oranda değiştiği nokta veya II. kısım ve III. kısımlara çizilen teğetlerin kesim noktası olarak tanımlanmaktadır (Subagio vd., 2003; Aragao vd., 2010).



Şekil 4.20. Temsili deformasyon – yük tekerrür sayısı ilişkisi

Çatlak ilerleme oranı (r_f), yorulma ömrü değerinden maksimum yük tekrar sayısına kadar her 1 mm deformasyon oluşabilmesi için gerekli yük tekrar sayısının ifade etmektedir. Çatlak ilerleme oranı ile ilgili formül aşağıda verilmiştir (Subagio vd., 2003). Çatlak ilerleme oranı, çatlak ilerleme hızıyla ters orantılıdır. Çatlak ilerleme oranının büyük olması, çatlak ilerleyişinin daha yavaş olduğunu göstermektedir.

$$r_f = \frac{N_p}{\delta_{fmax} - \delta_f} \quad (4.12)$$

Burada;

r_f : Çatlak ilerleme oranı (darbe sayısı/mm)

N_p : Çatlak ilerlemesi için gerekli yük tekrar sayısı

δ_{fmax} : Maksimum yük tekrar sayısındaki toplam deformasyon (mm)

δ_f : Yorulma ömründeki (Nf) toplam deformasyonu (mm) ifade etmektedir.



5.DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada grafitin bir katkı maddesi olarak bitüm ve bitümlü sıcak karışımlardaki etkileri araştırılmıştır. İlk önce çalışmada kullanılacak malzemelerin özellikleri ve şartnamelere uygunluğu tespit edilmiştir. Çalışma bitüm deneyleri ve bitümlü sıcak karışım deneyleri olmak üzere iki bölümden oluşmaktadır. Bitüm deneyleri için farklı oranlarda grafit içeren modifiye ve ayrıca saf bağlayıcılara penetrsayon, yumuşama noktası, dönel viskozite, dinamik kayma reometresi ve kırılganlık eğme deneyleri uygulanmıştır. Daha sonra saf bağlayıcı ile hazırlanmış bitümlü sıcak karışım numunelerinin optimum bitüm içeriği bulunmuş, bitüm içeriğinin değişmesinden doğacak bir farklılık oluşmaması ve bu şekilde bir kıyaslama yapılabilmesi için bu bitüm içeriğinde modifiye bağlayıcılarla karışım numuneleri hazırlanmıştır. Bitümlü karışım numuneleri taş mastik asfalt olarak hazırlanmıştır. Bitümlü sıcak karışım numunelerine indirek çekme rijitlik modülü ve indirek çekme yorulma deneyleri uygulanmıştır. Burada ayrıca saf ve modifiye karışımların yaşlanmadan nasıl etkilendiklerini tespit etmek amacıyla karışım numuneleri laboratuvarında etüvde sabit sıcaklıkta farklı sürelerde yaşlandırılmıştır. Belirli periyotlarla etüvden alınan numuneler deneylere tabi tutularak sonuçlar değerlendirilmiştir.

5.1. Bağlayıcılar Üzerinde Uygulanan Deneyler ve Sonuçları

Çalışmada saf bağlayıcı olarak TÜPRAŞ rafinerisinden temin edilen B 50/70 sınıfı asfalt çimentosu kullanılmıştır. Saf bağlayıcıya ait özellikler Tablo 5.1’de verilmiştir.

Tablo 5.1 Saf bağlayıcının özellikleri

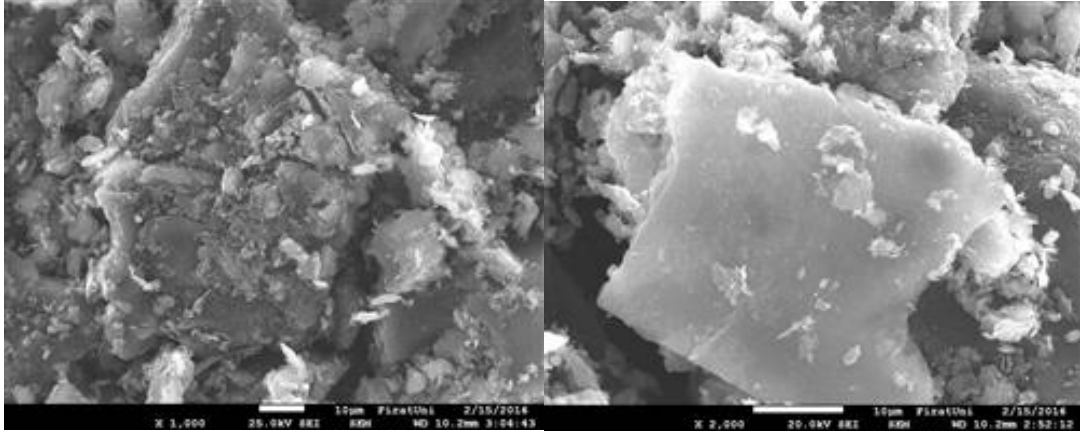
Özellikler	Standart	B 50/70
Penetrasyon (0,1 mm), 100 g, 5 s	ASTM D5	51,2
Yumuşama noktası (°C)	ASTM D36	52,2
Penetrasyon indeksi (PI)		-0,6
Özgül ağırlık		1,013
Viskozite (cP, 135°C)	ASTM D4402	175
Viskozite (cP, 165°C)	ASTM D4402	600
Karıştırma sıcaklığı (°C)		165,8
Sıkıştırma sıcaklığı (°C)		152,8

Bitüm modifikasyonunda kullanılan grafitin elementel analizi Tablo 5.2’de verilmiştir. Bitüm modifikasyonunda kullanılan grafit 200 nolu elekten elenerek kullanıma hazır hale getirilmiştir. Şekil 5.1 ve Şekil 5.2’de grafitte ait SEM görüntüleri verilmiştir.

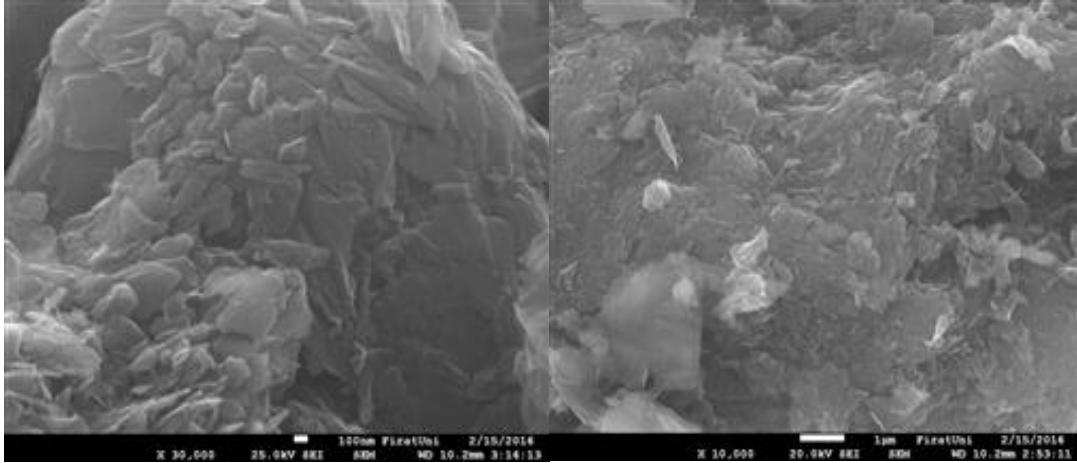
Tablo 5.2. Grafitin elementel analizi

C (%)	N(%)	H(%)	S(%)	O(%)	Nem(%)	Kül(%)	C (%)
85,7	-	-	0,1	12,9	0,4	0,6	85,7

Modifiye bağlayıcılar hazırlanırken grafit karıştırma kabı içindeki 160°C sıcaklıktaki bağlayıcıya belirlenen oranlarda yavaş yavaş ilave edilerek dört bıçaklı karıştırıcı ile 1000 devir/dakika hızda 1 saat karıştırılarak hazırlanmıştır. İçerisinde grafit bulunmayan saf bağlayıcıya da aynı karıştırma işlemi uygulanmış böylece karıştırma esnasında meydana gelen yaşlanma etkisinin karşılaştırmalara engel olması önlenmiştir.



Şekil 5.1. Grafitin x1000 SEM görüntüleri



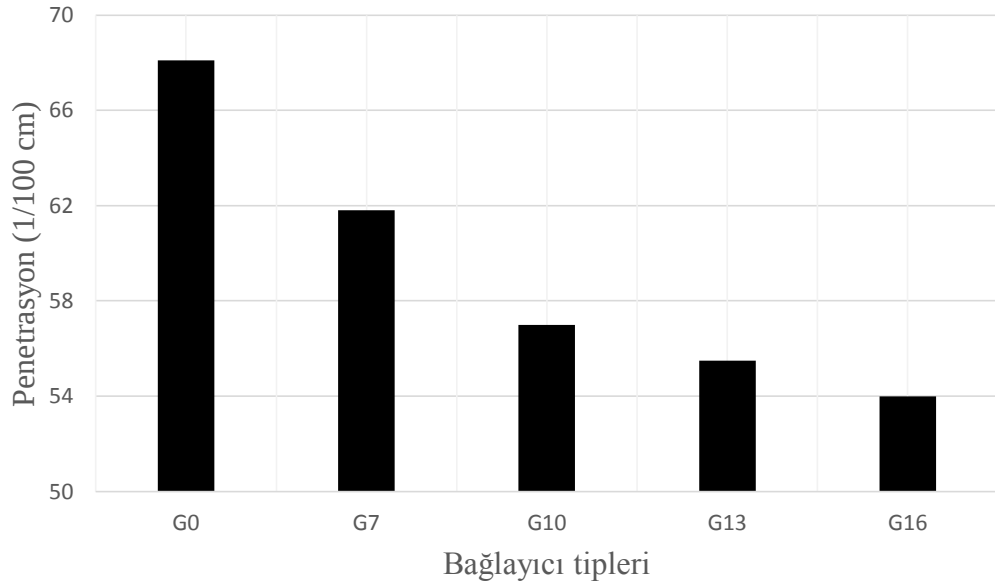
Şekil 5.2. Grafitin x10000 SEM görüntüleri

Çalışmada grafit saf bağlayıcıya, bağlayıcı ağırlığınca %7 (G7), %10 (G10), %13 (G13) ve %16 (G16) oranlarında katılmıştır. Saf ve modifiyeli bağlayıcılara ilk önce penetrasyon ve yumuşama noktası deneyleri uygulanmış ve bu iki değerden faydalanılarak ayrıca bağlayıcıların ısıya karşı hassasiyetinin bir ölçüsü olan Penetrasyon İndeksi (PI) değerleri hesaplanmıştır. Daha sonra 135°C ve 165°C sıcaklıktaki dönel viskoziteleri tespit edilerek akmaya karşı dirençleri ve ayrıca karıştırma-sıkıştırma sıcaklıkları belirlenmiştir. 52°C, 58°C, 64°C ve 70°C sıcaklıklarda uygulanan dinamik kayma reometresi deneyi ile bağlayıcıların tekerlek izi parametreleri belirlenmiştir. Bağlayıcıların düşük sıcaklık

davranışlarını değerlendirmek için son olarak -20°C’de kiriş eğme reometresi deneyi yapılmıştır.

5.1.1. Penetrasyon Deney Sonuçları

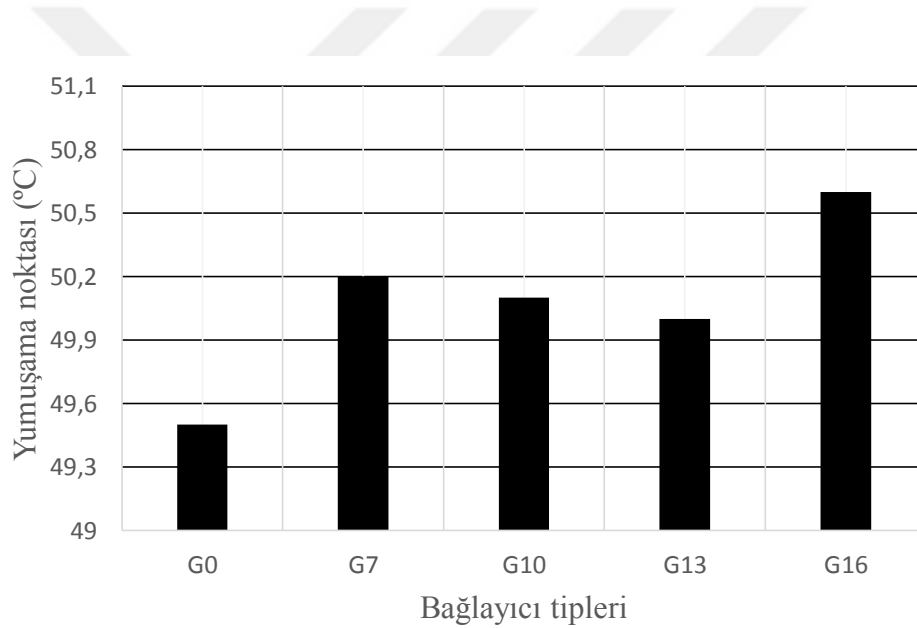
Saf ve katkılı bağlayıcılara uygulanan penetrasyon deneyinden elde edilen sonuçlar Şekil 5.3’te verilmiştir. Burada verilen sonuçlar bir deney numunesinde yapılan toplam 6 ölçümün ortalamasıdır. Grafit içeriğinin artması ile penetrasyon değerlerinde düzenli bir azalış söz konusudur. G7, G10, G13 ve G16 bağlayıcıları saf bağlayıcıya göre sırasıyla %9.2, %16.3, %18.5 ve %20.7 daha düşük penetrasyon değerleri vermiştir. Yumuşama noktasında önemli bir değişikliğe neden olmayan grafit ilavesinin penetrasyon deneyinde bağlayıcının sertleşmesine neden olması, burada meydana gelen sertleşmenin fiziksel bir değişimden kaynaklanması olarak düşünülmektedir.



Şekil 5.3. Grafit içeriği- penetrasyon ilişkisi

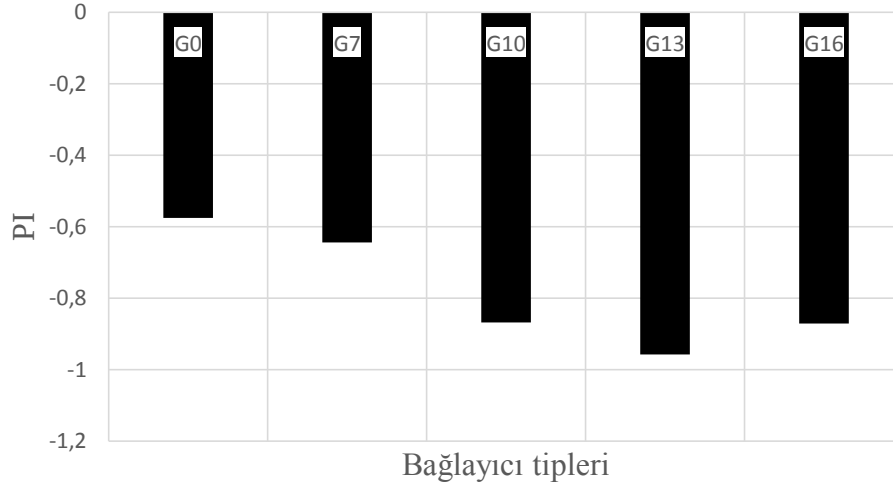
5.1.2. Yumuşama Noktası Deney Sonuçları

Şekil 5.4’de katkı içeriği ile birlikte yumuşama noktasında meydana gelen değişim verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere saf bağlayıcıya grafit ilavesi yumuşama noktasını artırmasına rağmen bu artışta katkı içeriği ile düzgün bir ilişkinin olmadığı ve bu artışın en yüksek katkı içeriği olan %16 oranında meydana geldiği ancak bu artışın da saf bağlayıcıya göre sadece 2°C olduğu görülmektedir. Bu sonuca göre bitüme grafit ilavesinin yumuşama noktasında önemli bir değişiklik yapmadığı söylenebilir.



Şekil 5.4. Grafit içeriği- yumuşama noktası ilişkisi

Saf ve katkılı bağlayıcılara uygulanan penetrasyon ve yumuşama noktası deneylerinden yararlanılarak elde edilen penetrasyon indeksi değerleri Şekil 5.5’de verilmiştir. Grafit içeriğinin artması ile penetrasyon indeksi değerlerinde G16 bağlayıcısı hariç düzenli bir azalış söz konusu olmuştur. Şekilde görüldüğü gibi grafit oranı arttıkça G16 bağlayıcısı hariç ısıya karşı duyarlılık artmıştır. G13 bağlayıcısı karışım sırasında enerji ve süre kullanımı bakımından olumlu sonuçlar verir. Fakat kaplamada yüksek sıcaklıkta meydana gelen kalıcı deformasyonları ve düşük sıcaklık çatlakları açısından olumsuz sonuçlar doğurabilir.



Şekil 5.5. Grafit içeriği ve penetrasyon indeksi arasındaki ilişki

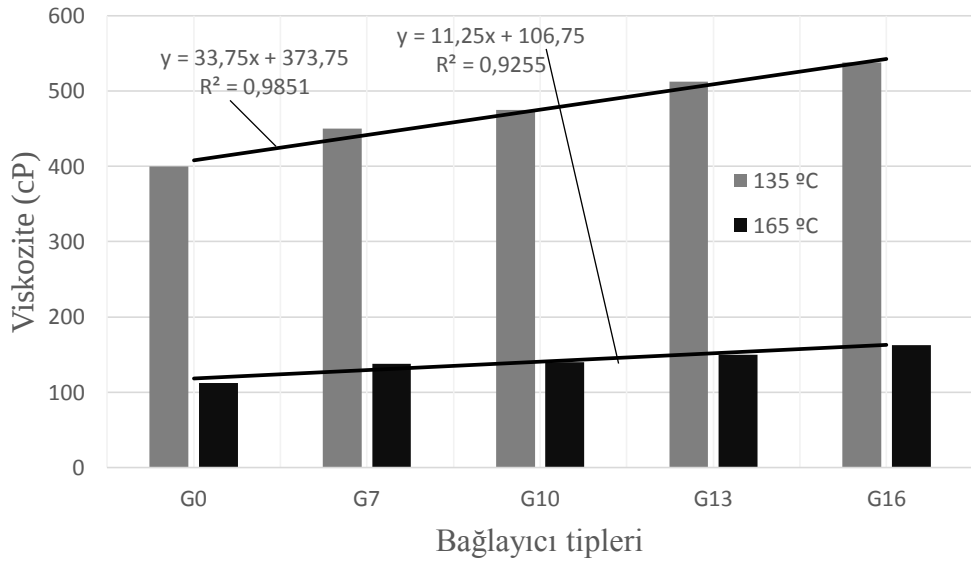
5.1.3. Dönel Viskozimetre (RV) Deney Sonuçları

Saf ve grafit katkılı bağlayıcıların 135°C ve 165°C’de belirlenen viskoziteleri Şekil 5.6’da verilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere her iki sıcaklıkta da viskozite değerlerinde katkı içeriğinin artması ile düzenli bir artış söz konusudur. Grafitin %16 oranında kullanılması durumunda saf bağlayıcıya göre viskozite değeri 135°C ve 165°C sıcaklıklar için sırasıyla %34 ve %44 artmaktadır. Grafitin en yüksek değerde (%16) kullanılması durumunda elde edilen viskozite değeri (537,5 cP), sıcak karışımların işlenebilirliğinde sorun teşkil edecek olan 3000 cP değerinden oldukça düşük olduğundan, katkı kullanımı ile birlikte viskozitede meydana gelen artış işlenebilirlik açısından olumsuz bir etki oluşturmayacaktır. Buna karşın viskozitede meydana gelen artışın bitümlü sıcak karışımların yüksek sıcaklıktaki kalıcı deformasyonlara karşı direncini artırabileceği söylenebilir. Burada oluşabilecek olumsuz etkiler artan viskozitenin bitümlü karışımların karıştırma-sıkıştırma sıcaklıklarının artmasına neden olmasıdır. Tablo 5.3’de bağlayıcıların ortalama 170 cP ve 280 cP viskozitelere karşılık gelen karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları

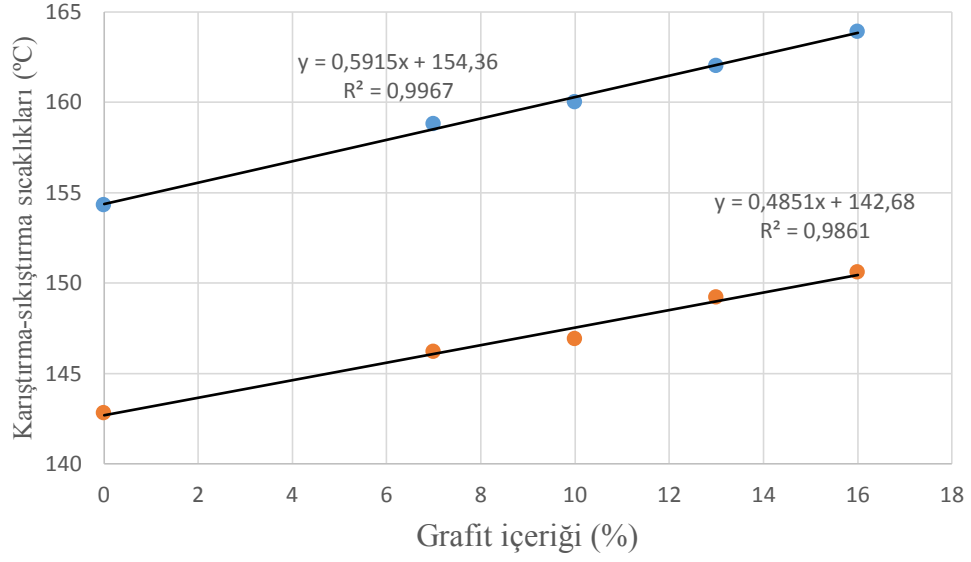
verilmiştir. Buradan görüldüğü üzere %16 grafit kullanımı karıştırma sıcaklığını 9,6°C, sıkıştırma sıcaklığını ise 7,8°C artmasına neden olmaktadır. Yüksek sıcaklıkta bağlayıcıların viskozite değerleri arasındaki farkların azalmasından dolayı yüksek sıcaklıktaki viskozite değeri ile tespit edilen sıkıştırma sıcaklıkları arasındaki fark karıştırma sıcaklıklarındakilerden daha azdır. Şekil 5.7’de grafit içeriği ile birlikte karıştırma-sıkıştırma sıcaklıklarındaki değişim grafiksel olarak verilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere grafit içeriğinin artması ile karıştırma-sıkıştırma sıcaklıkları lineer olarak artmaktadır.

Tablo 5.3 Bağlayıcıların karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları

Bağlayıcı tipi	Karıştırma sıcaklığı °C	Sıkıştırma sıcaklığı °C
G0	154,3	142,8
G7	158,8	146,2
G10	160,0	146,9
G13	162,0	149,2
G16	163,9	150,6



Şekil 5.6. 135°C ve 165°C’de viskozitelerdeki değişim



Şekil 5.7. Karıştırma-sıkıştırma sıcaklıklarındaki değişim

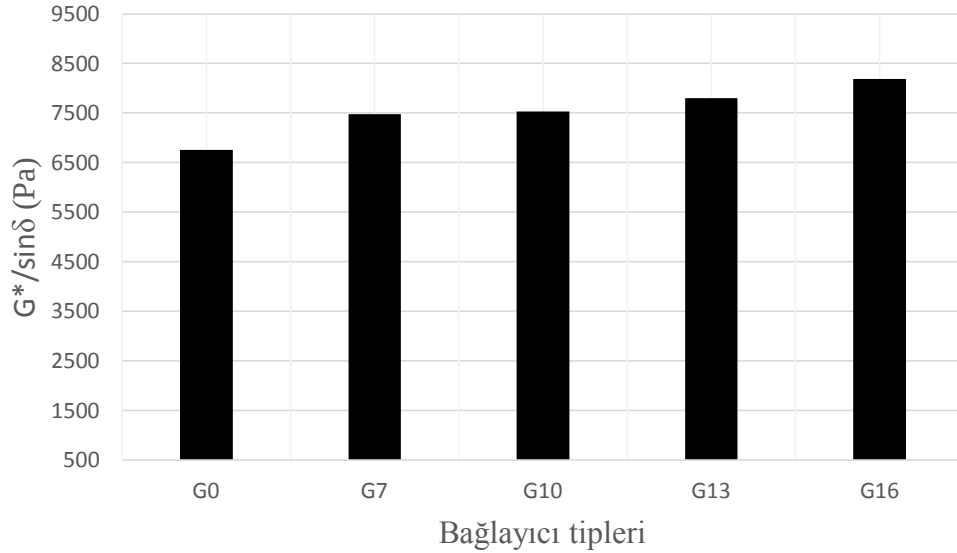
5.1.4 Dinamik Kayma Reometresi (DSR) Deney Sonuçları

Çalışmada saf ve katkılı bağlayıcılara 1,59 devir/saniye (Hz) hızda 52, 58, 64 ve 70°C, sıcaklıklarda DSR deneyi uygulanarak bağlayıcıların yüksek sıcaklık performansları değerlendirilmiştir. Tablo 5.4’de deneylerden elde edilen sonuçlar verilmiştir.

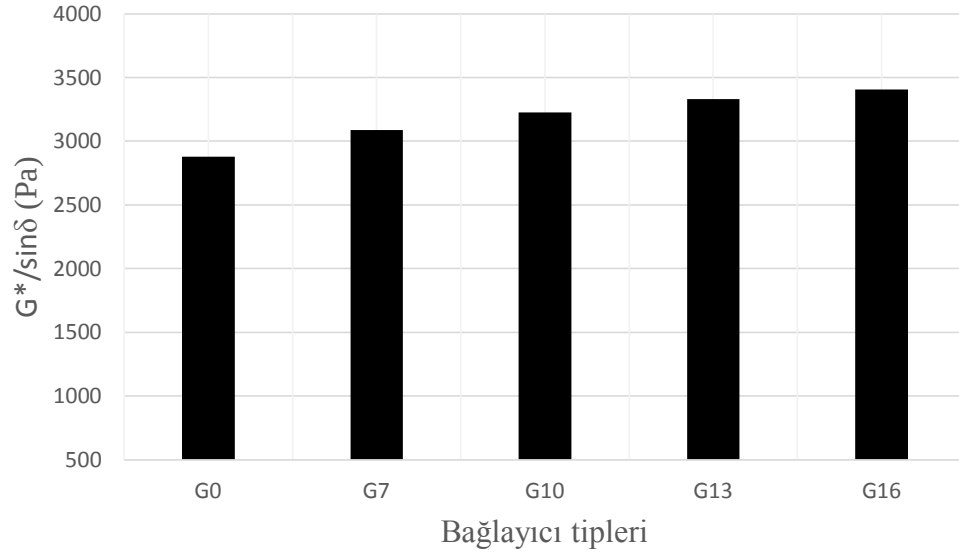
Tablo 5.4 DSR deney sonuçları

Sıcaklık	52°C		58°C		64°C		70°C	
Özellik	G*/sinδ (Pa)	δ (°C)	G*/sinδ (Pa)	δ (°C)	G*/sinδ (Pa)	δ (°C)	G*/sinδ (Pa)	δ (°C)
Saf (G0)	6752	83,66	2879	85,13	1237	86,56	586	87,79
G7	7529	83,61	3089	85,16	1390	86,57	615	87,81
G10	7476	83,42	3226	84,80	1398	86,03	662	87,01
G13	7804	83,81	3331	85,31	1445	86,68	694	87,05
G16	8187	84,07	3405	85,42	1496	86,70	711	87,90

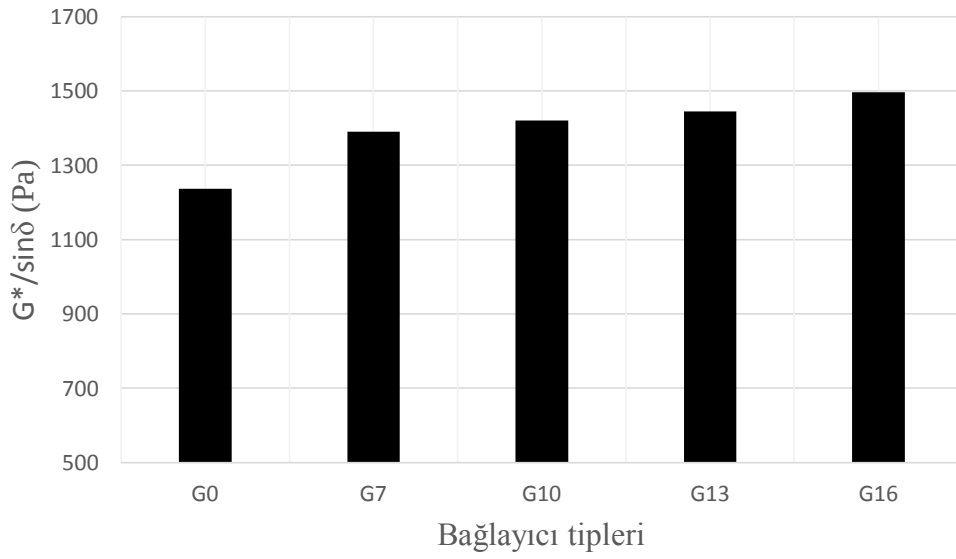
Şekil 5.8 – 5.11’de sırasıyla 52, 58, 64 ve 70°C’lerde farklı katkı içeriklerindeki bağlayıcıların tekerlek izi parametresinin değişimi verilmiştir. Bütün sıcaklıklarda grafit içeriğinin artması ile birlikte tekerlek izi parametresi sürekli artmaktadır. 52°C’de en yüksek grafit kullanımında (%16) saf bağlayıcıya göre tekerlek izi parametresi %21,2; 58°C’de % 18,2; 64°C’de %20,9 ve 70°C’de %21,3 oranında artmıştır. Viskozite deney sonuçları ile doğru orantılı olarak grafit katkılı karışımların saf karışımlara göre bir miktar daha iyi yüksek sıcaklık performansı sunacağı görülmektedir. Grafit katkısının %7 den %13’e artması yani katkının yaklaşık iki kat artması tekerlek izi parametresini ilgili sıcaklıklarda %4 ile %12 arasında değiştirmektedir. Dolayısıyla tekerlek izi parametresinin artırılmak istendiği durumda yüksek oranda grafit kullanımının önemli bir etkisi olmadığı görülmektedir.



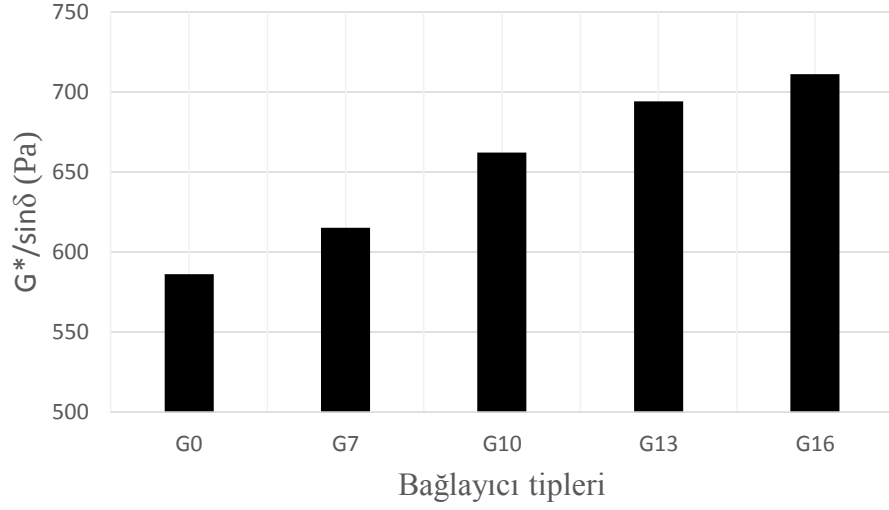
Şekil 5.8. 52°C’de G*/sinδ değerleri



Şekil 5.9. 58°C’de $G^*/\sin\delta$ değerleri

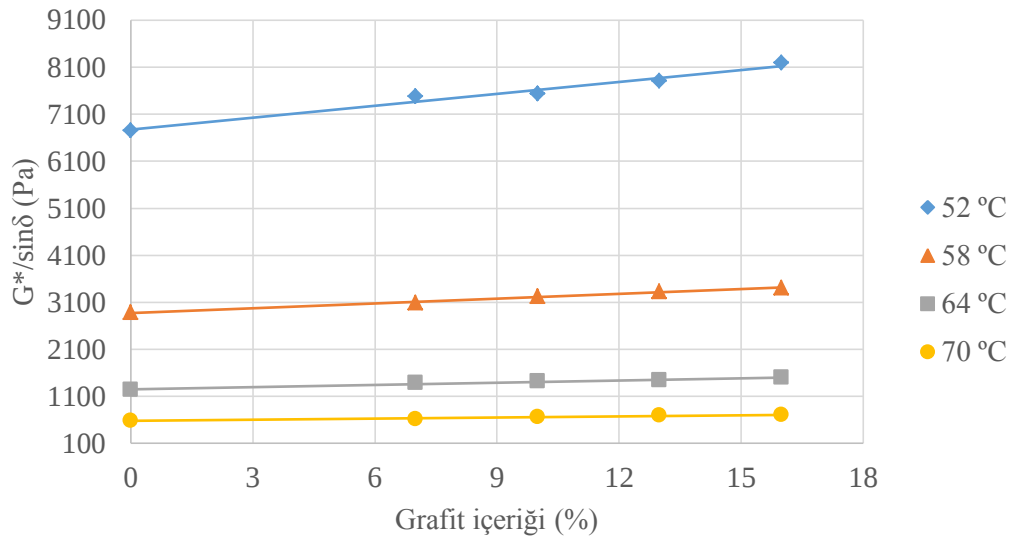


Şekil 5.10. 64°C’de $G^*/\sin\delta$ değerleri



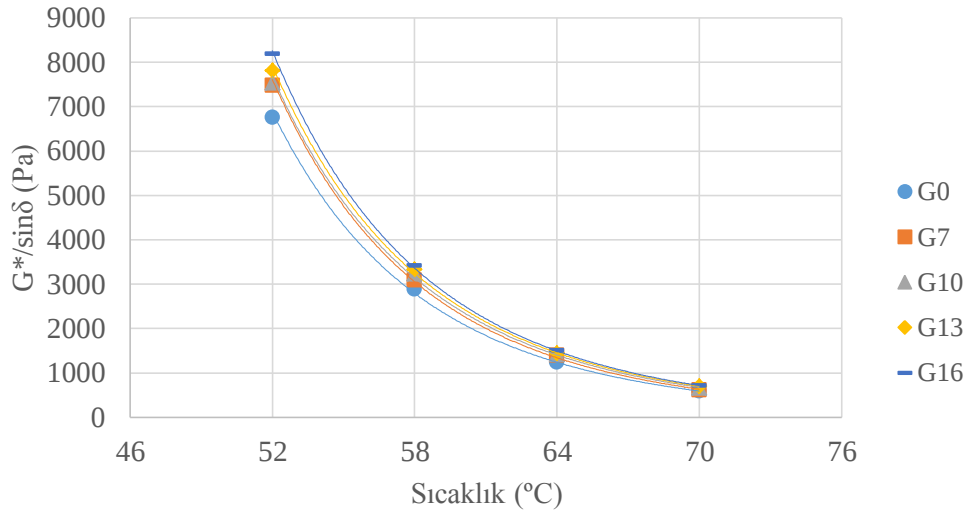
Şekil 5.11. 70°C’de G*/sinδ değerleri

Şekil 5.12’de bütün sıcaklıklarda grafit içeriğine göre tekerlek izi parametresinde meydana gelen değişim birlikte verilmiştir. Buradan da görüldüğü üzere grafit içeriğinin tekerlek izi parametresi üzerinde önemli bir değişiklik yapmadığı en fazla etkinin düşük sıcaklıkta olduğu, sıcaklığın artması ile grafitin tekerlek izi parametresini artırma yönündeki etkinin azaldığı tespit edilmiştir.



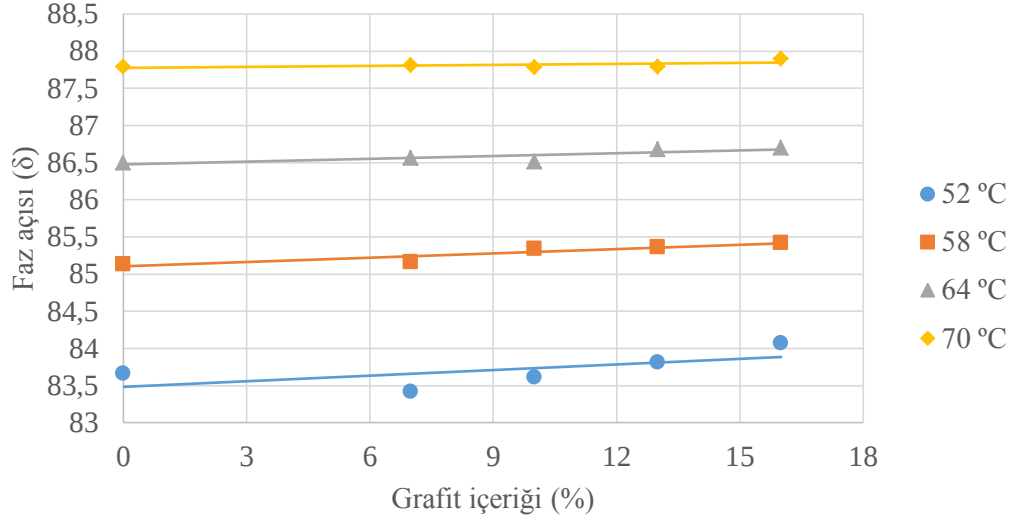
Şekil 5.12. Farklı sıcaklıklarda G*/sinδ – grafit içeriği ilişkisi

Şekil 5.13'te farklı grafit içeriğindeki bağlayıcıların tekerlek izi parametrelerinin sıcaklığa göre değişimi verilmiştir. Sıcaklığın artması ile birlikte bütün bağlayıcılarda $G^*/\sin\delta$ değeri üstel bir şekilde azalmaktadır. Bu etki bütün bağlayıcılar için aynı eğilimi göstermektedir. Dolayısıyla herhangi bir grafit içeriği sıcaklıktan farklı bir şekilde etkilenmemektedir.



Şekil 5.13. $G^*/\sin\delta$ değerlerinin sıcaklığa bağlı olarak değişimi

Şekil 5.14'te bağlayıcıların faz açılarındaki değişim verilmiştir. Burada da yine tekerlek izi parametresinde olduğu gibi faz açılarının grafit içeriği ile önemli bir değişiklik göstermediği, grafit içeriğinin değişmesi ile faz açılarında meydana gelen önemsiz değişikliğin her sıcaklıkta aynı eğilimi gösterdiği belirlenmiştir. Dolayısıyla grafit kullanımının bağlayıcının elastik özellikleri üzerinde olumlu ya da olumsuz bir etki yapmadığı buna göre grafit kullanımının karışımların düşük sıcaklık performansını etkilemeyeceği söylenebilir.



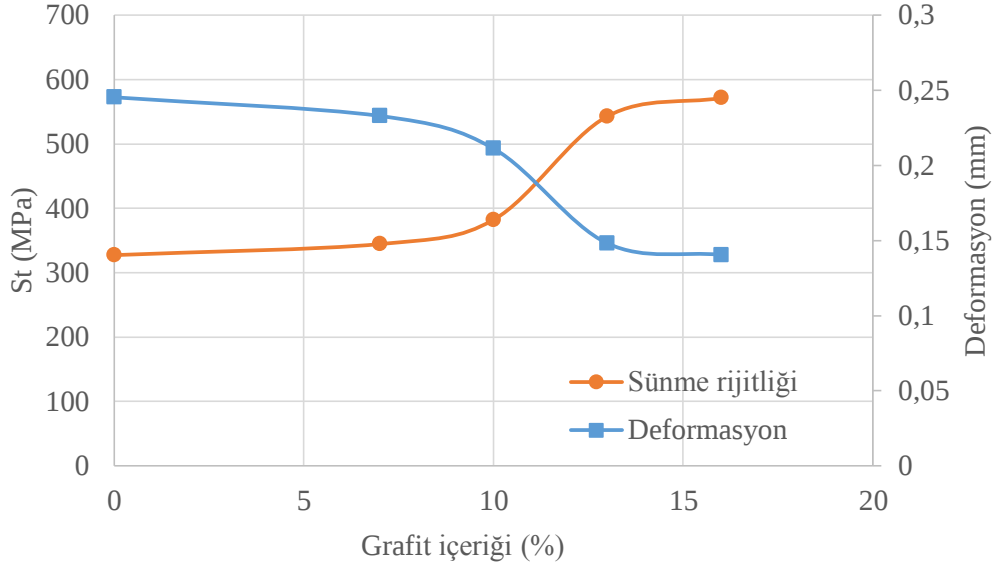
Şekil 5.14. Farklı sıcaklıklarda grafit içeriği-faz açısı ilişkisi

5.1.5. Kiriş Eğme Reometresi Deney Sonuçları

Çalışmada grafitin çok düşük sıcaklıklardaki performansını değerlendirmek için kiriş eğilme reometresi deneyi yapılmıştır. -20°C’de yapılan deneyde bağlayıcıların sünme rijitlikleri (St), m-değeri ve deformasyon değerleri tespit edilmiştir. Sonuçlar Tablo 5.5’te verilmiştir. Tablodan görüldüğü üzere grafit içeriği ile deformasyon ve rijitlik değerleri önemli ölçüde değişirken m-değerlerinde önemli bir değişiklik olmamaktadır. Şekil 5.15’te grafit içeriği ile deformasyon ve rijitlikte meydana gelen değişim verilmiştir.

Tablo 5.5 BBR deney sonuçları

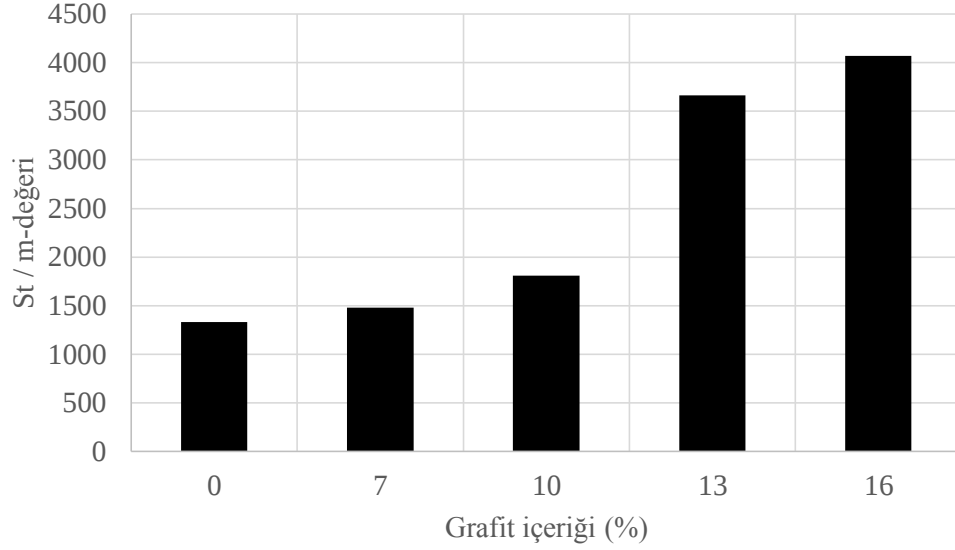
Bağlayıcı	Deformasyon (mm)	St (MPa)	m-değeri
Saf (G0)	0,2454	327,39	0,2747
G7	0,2330	344,55	0,2875
G10	0,2113	382,28	0,2855
G13	0,1482	542,98	0,3039
G16	0,1405	571,51	0,2714



Şekil 5.15. Grafit içeriğiyle rijitlikte ve deformasyonda meydana gelen değişim

Şekilden görüldüğü üzere grafit içeriğinin artması ile deformasyon azalmakta ve rijitlik artmaktadır. Özellikle %10 grafit içeriğinden sonra bu iki değerde de önemli değişiklik meydana gelmektedir. %7, %10, %13 ve %16 grafit ilavesi saf bağlayıcının rijitliğini sırasıyla %5, %17, %65 ve %75 oranlarında artırmaktadır. İyi bir düşük sıcaklık performansı bakımından sünme rijitliği değerlerinin düşük, m-değerlerinin ise yüksek olması beklenmektedir. Dolayısıyla rijitliğin, m-değerine oranı olan “ μ ” daha gerçekçi bir değerlendirme yapmak için kullanılmaktadır. “ μ ” değerinin küçük olması düşük sıcaklıktaki esnek davranış için arzu edilen bir durumdur. Şekil 5.16’da grafit içeriği ile “ μ ” değerlerinde meydana gelen değişim verilmiştir.

Burada da %10 grafit içeriğinden sonra bağlayıcının aşırı derecede rijitleştiği dolayısıyla kötü bir düşük sıcaklık performansına sahip olacağı diğer bir ifade ile %10 oranından daha fazla grafit içeren bağlayıcılarla üretilen sıcak karışımların düşük ısı çatlaklarına karşı çok hassas olacağı belirlenmiştir.



Şekil 5.16. St/m-değerlerinin grafit içeriği ile değişimi

5.2. Bitümlü Sıcak Karışımlar Üzerinde Yapılan Deneyler

Grafit kullanımının sadece bitümlü bağlayıcılar üzerinde değil ayrıca bitümlü sıcak karışımlar üzerinde de etkilerini inceleyerek geniş çaplı bir değerlendirme yapmak amacıyla, bitüm ağırlığınca %10, %15 ve %20 grafit içeren katkıli bağlayıcılarla bitümlü sıcak karışım numuneleri hazırlanmıştır. Bitümlü sıcak karışım numuneleri tekerlek izine karşı direnci yüksek olan ve içerdiği fazla bitüm nedeni ile durabilitesi de yüksek olan ve son zamanlarda yüksek standartlı yollarda yaygın bir şekilde kullanılmaya başlayan taş-mastik asfalt olarak hazırlanmıştır. Tablo 5.6’da karışımlarda kullanılan agregaya ait özellikler Tablo 5.7’de ise Karayolları Teknik Şartnamesi taş-mastik aşınma tabakası Tip-1’e göre hazırlanan karışım gradasyonu verilmiştir. Karışımlarda kullanılan agregaya Elazığ Karayolu bölgesinden temin edilen kırmataş kalkerdir.

Karışım deneylerine geçmeden önce deneylerde kullanılmak üzere hazırlanacak numuneler için optimum bitüm içeriği belirlenmiştir. Çalışmada saf bitüm içeren karışım için optimum bitüm içeriği belirlenmiş ve grafit katkıli numuneler de bu bitüm içeriğinde hazırlanmıştır. Saf bağlayıcı ile üretilen numuneler G0, % 10, %15 ve %20 grafit katkıli bağlayıcılarla üretilen numuneler de sırasıyla G10, G15 ve G20 olarak gösterilmiştir.

Tablo 5.6. Agreganın fiziksel özellikleri

Özellikler	Standart	Limitler	Kaba	İnce	Filler
Aşınma kaybı (%) (Los Angeles)	ASTM C 131	Max 30	25	-	-
Don etkisi (%) (ile Na ₂ SO ₄)	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 ³)	ASTM C127		2.613	-	-
Özgül ağırlık (g/cm ³)	ASTM C128		-	2.622	-
Özgül ağırlık (g/cm ³)	ASTM D854		-	-	2.711

Tablo 5.7. Agregada gradasyonu

Elek çapı (mm)	19	12.5	9.5	4.75	2.0	0.425	0.180	0.075
Geçen (%)	100	95	62.5	37.5	25	17	13	10

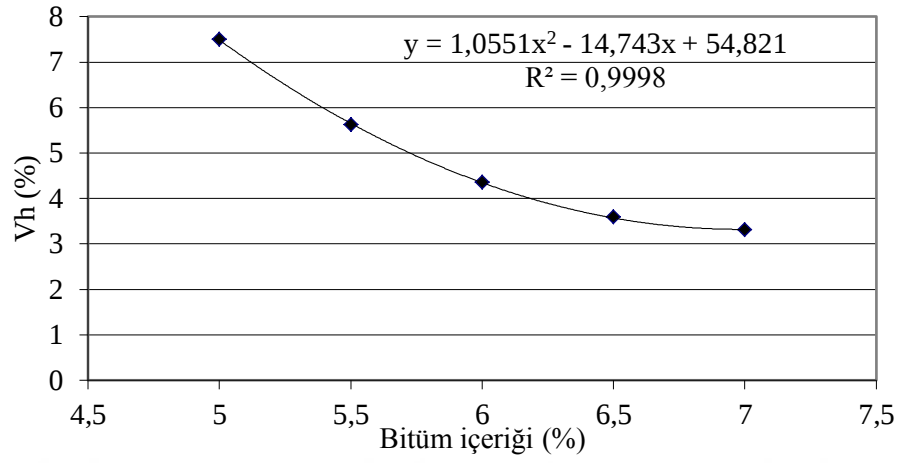
5.2.1 Optimum Bitüm Oranının Belirlenmesi

Saf bağlayıcı ile hazırlanan karışımların optimum bitüm içeriğinin belirlenmesi için Marshall briketleri her iki yüzüne 50 darbe vurularak hazırlanmıştır. Bitüm içeriği % 5’den başlayarak 0,5 artımlarla %7’ye kadar artırılmıştır. Elyaf %0,5 oranında kullanılmıştır. Farklı bitüm içeriğinde üçer adet hazırlanan numunelerin hacimsel özellikleri ve ayrıca stabilite ve akma değerleri tespit edilmiştir. Tablo 5.8’de elde edilen sonuçlar verilmiştir. Şekil 5.17-5.22’de özelliklerin bitüm içeriğine göre değişimi grafiksel olarak verilmiştir.

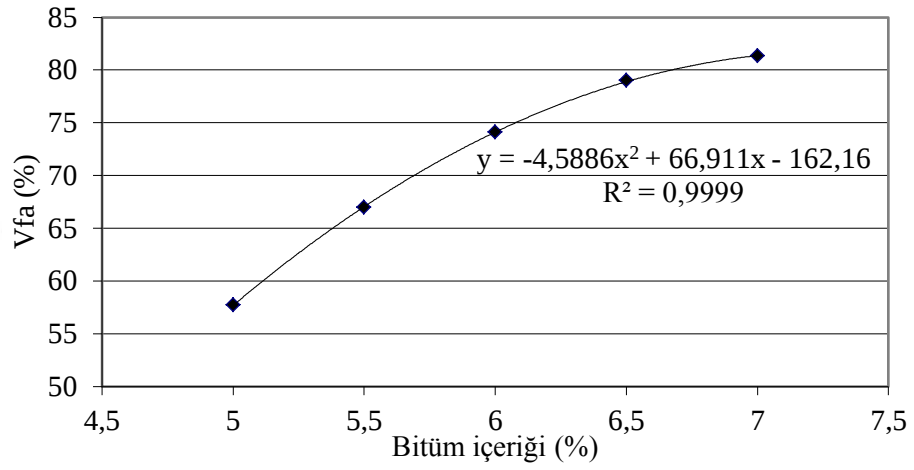
Tablo 5.8. Marshall tasarım deney sonuçları

(Kaba Agrega Oranı: %62,5; İnce Agrega Oranı: %27,5; Filler Oranı: %10; Efektif Özgül Ağırlık: 2,620)

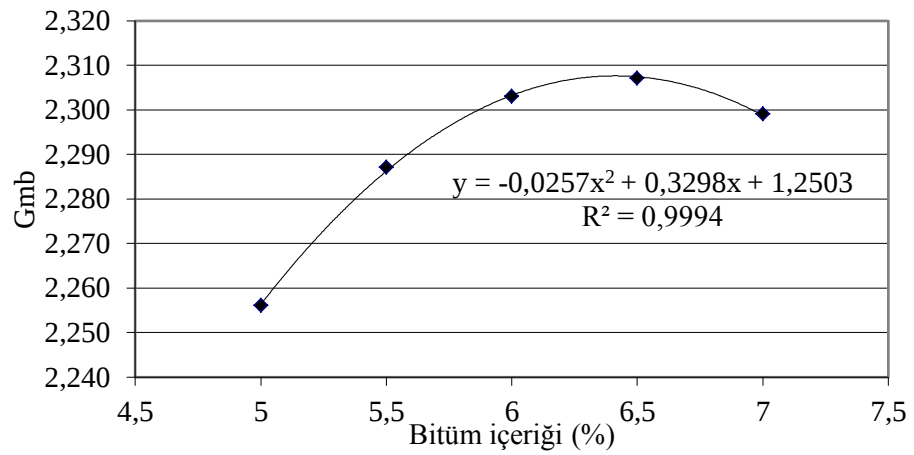
Wa (%)	W_{kuru} (gr)	W_{doygun} (gr)	W_{suda} (gr)	Gmb	Gmm	Vh (%)	V_{MA} (%)	Vfa (%)	Stabilite (kg)	Akma (mm)
5,0	1157,43	1165,02	653,33	2,262	2,439	7,26	17,52	58,57	955,65	7,1
	1156,10	1163,78	650,57	2,253		7,64	17,86	57,22	997,05	6,0
	1153,58	1163,76	651,90	2,254		7,60	17,82	57,37	987,85	6,2
Ort.				2,256		7,50	17,73	57,72	980,18	6,43
5,5	1164,77	1169,17	660,00	2,288	2,423	5,59	16,98	67,06	1022,35	5,2
	1159,84	1163,43	657,23	2,291		5,44	16,85	67,70	970,60	5,6
	1163,36	1167,71	657,95	2,282		5,82	17,18	66,14	994,75	5,9
Ort.				2,287		5,617	17,00	66,96	995,90	5,56
6,0	1165,54	1168,60	662,12	2,301	2,408	4,42	16,88	73,83	1014,30	6,7
	1167,93	1171,84	664,01	2,300		4,48	16,93	73,55	1039,60	7,5
	1168,54	1171,24	664,70	2,307		4,18	16,67	74,92	1070,65	7,0
Ort.				2,303		4,36	16,83	74,10	1041,51	7,07
6,5	1173,89	1175,84	667,91	2,311	2,392	3,40	16,91	79,91	990,15	7,2
	1174,30	1177,07	667,78	2,306		3,62	17,11	78,82	957,95	6,8
	1172,09	1174,35	665,42	2,303		3,74	17,20	78,29	939,55	6,4
Ort.				2,307		3,59	17,07	79,00	962,55	6,80
7,0	1180,13	1182,91	669,62	2,299	2,378	3,30	17,73	81,40	908,50	4,8
	1182,54	1184,89	670,97	2,301		3,22	17,66	81,77	856,75	5,4
	1176,29	1177,86	665,57	2,296		3,43	17,84	80,80	869,40	4,8
Ort.				2,299		3,31	17,74	81,32	878,21	5,00



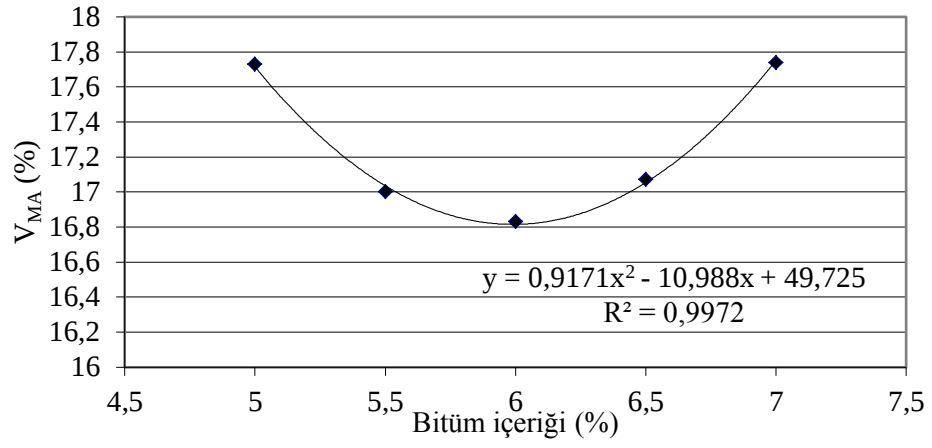
Şekil 5.17. Bitüm içeriği- Vh ilişkisi



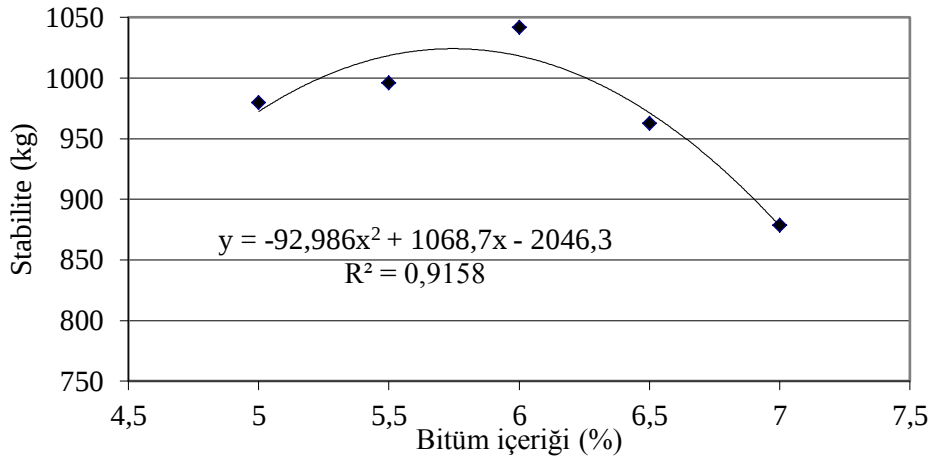
Şekil 5.18. Bitüm içeriği- Vfa ilişkisi



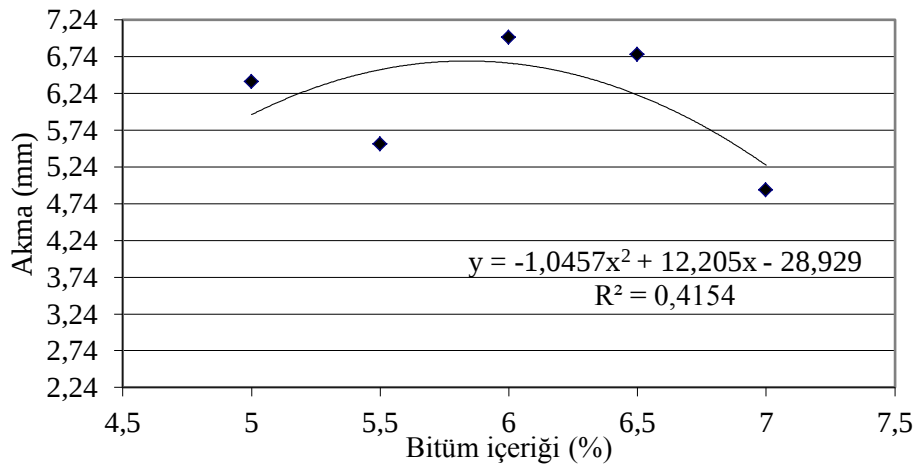
Şekil 5.19. Bitüm içeriği- Gmb ilişkisi



Şekil 5.20. Bitüm içeriği- V_{MA} ilişkisi



Şekil 5.21. Bitüm içeriği- Stabilite ilişkisi



Şekil 5.22. Bitüm içeriği- Akma ilişkisi

Taş mastik asfalt karışımların optimum içeriğinin belirlenmesinde sıcak bölgeler için boşluk oranının ortalama %3,5 ve agregalar arası boşluk oranının ise Tip-1 gradasyonu için minimum %16 olması istenmektedir. %6,5 bitüm içeriğinde boşluk oranı %3,59 agregalar arası boşluk ise %17,07 olarak tespit edilmiştir. Buna göre saf karışımın optimum bitüm içeriği %6.5 olarak seçilmiştir. Optimum bitüm içeriğindeki özellikler Tablo 5.9’da verilmiştir.

Tablo 5.9. %6,5 bitüm içeriğindeki özellikler

Özellikler	Değerler	Görüşler
V _{MA} (%)	17,07	Min.%16 şartını sağlamakta
V _h (%)	3,59	Ortalama %3,5 şartını sağlamakta
Stabilite (kg)	962,55	Maksimum stabilitenin %92’sini sağlamakta. Yoğun gradasyon için geçerli plan min.900 kg’ın üstünde
Akma (mm)	6,80	Taş-mastik karışımlarda akma değerleri yoğun gradasyona göre yüksek çıkmaktadır.
Schellenberger Bitüm Süzülme (%)	0,28	Max 0,3 değerini geçmemektedir.
Yoğunluk (Gmb)	2,307	Maksimum yoğunluğun %99’unu sağlamakta

Grafit katkılı numuneler saf karışımın bitüm içeriğinde hazırlanmıştır. Her bir numune tipinden üçer adet hazırlanarak stabilite ve hacimsel özellikleri tespit edilmiştir. Tablo 5.10’da bütün numune tiplerinin %6,5 bitüm içeriğindeki özellikleri ortalama değerler olarak verilmiştir.

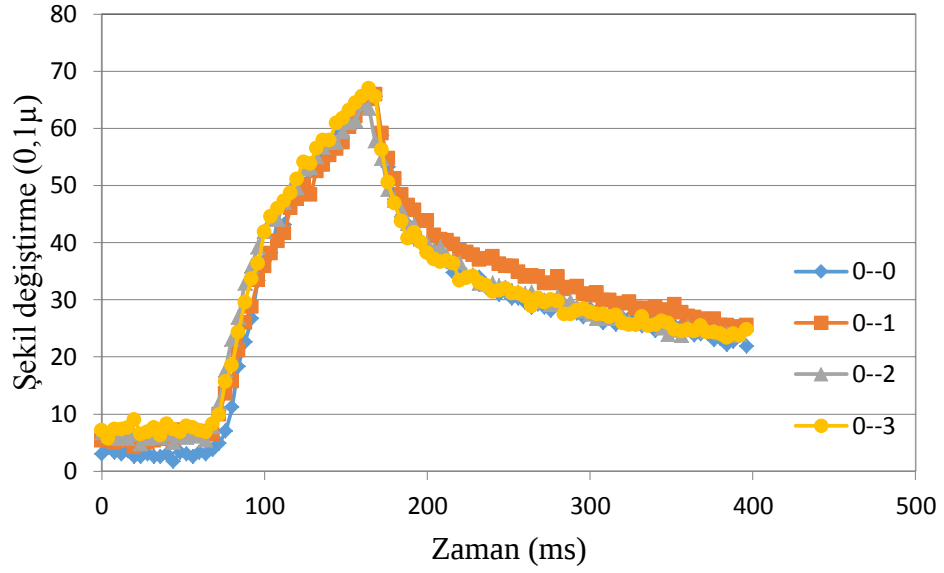
Tablo 5.10. Bütün numune tiplerinin %6,5 bitüm içeriğindeki hacimsel ve mekanik özellikler

Numune tipi	Gmb	Vh (%)	V _{MA} (%)	Vfa (%)	Stabilite (kg)	Akma (mm)
G0	2,307	3,59	17,07	79,91	962,55	6,80
G10	2,313	3,34	16,86	80,10	938,23	6,33
G15	2,306	3,59	17,08	78,96	929,40	6,62
G20	2,308	3,53	17,02	79,27	905,18	6,86

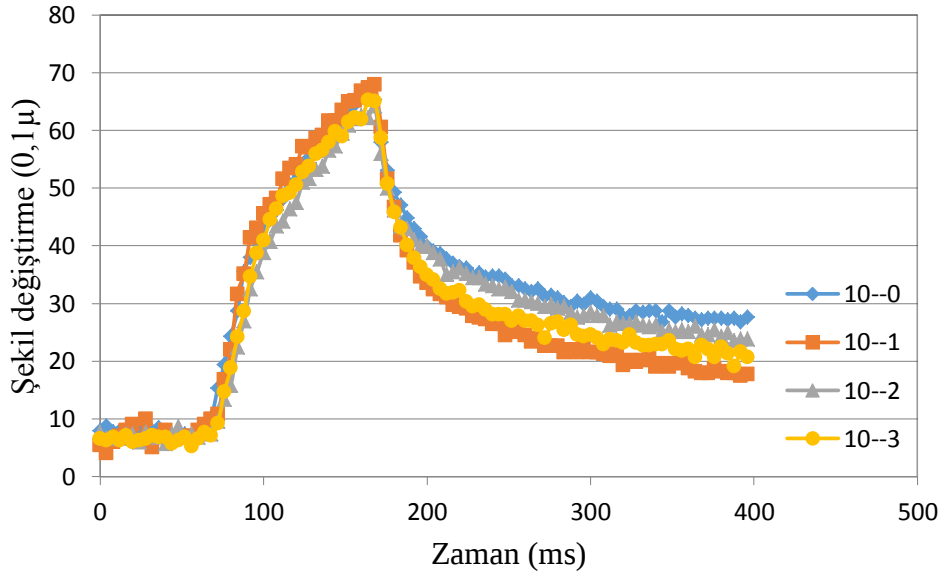
5.2.2. İndirek Çekme Rijitlik Modülü Deney Sonuçları

Bu deney için her bir numune tipinden üçer adet numune hazırlanmıştır. Her bir numune üç farklı yerinden yüklemeye maruz bırakılarak bir numune tipi için 9 değer elde edilmiştir. Bu değerlerin en büyük ve en küçüğü dışındakilerin ortalamaları hesaplanarak ITSM değeri olarak belirlenmiştir. Deney 20°C’de deformasyon kontrollü olarak yapılmıştır. Hedef deformasyon miktarı 6,5 mikron olarak seçilmiştir.

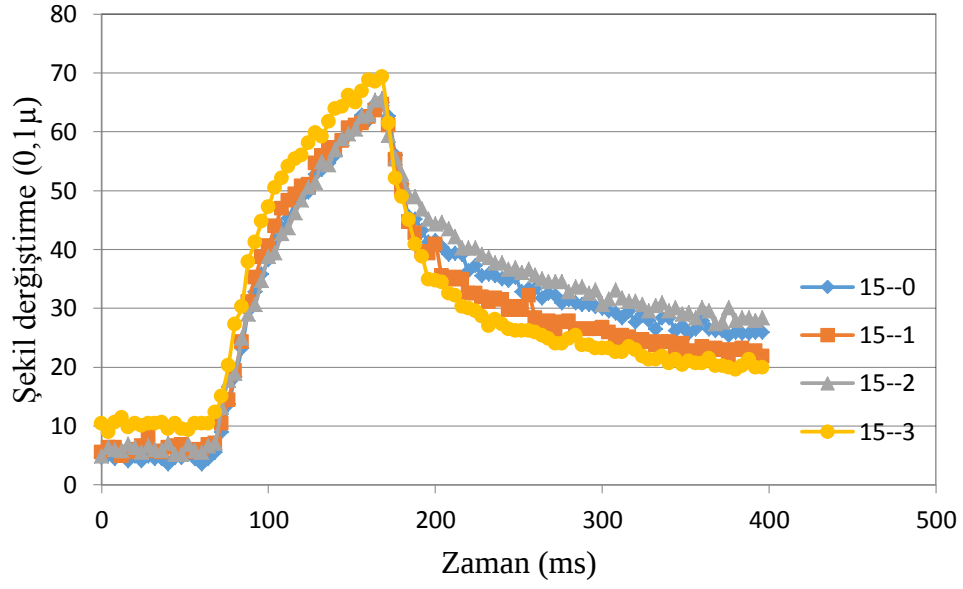
Şekil 5.23- 5.26’da zaman-şekil değiştirme ilişkileri verilmiştir. Şekillerde sırası ile saf, %10, %15 ve %20 grafit içeriğindeki orijinal ve 1, 2, 3 hafta yaşlandırılmış numunelere ait eğriler verilmiştir. Zamana bağlı olarak şekil değiştirme davranışı incelendiğinde numunelerin yaklaşık 150 milisaniyede maksimum hedef deformasyonu yaptıktan sonra üzerindeki yük kalktığından deformasyonlar geri dönmektedir. Deney elastik sınırlar içine yapıldığından deney süresi sonu olan 3000 milisaniyede bütün şekil değiştirmeler sıfıra dönmektedir. Deformasyonların geri dönüş hızı dolayısıyla esnek davranışlar hakkında bilgi sahibi olmak amacıyla Şekil 5.23-5.26’da 400. milisaniyeye kadar olan durumlar verilmiştir. Şekillerde 400. milisaniyedeki şekil değiştirmelerin bütün grafit içeriklerinde 2 ile 3 mikron arasında kaldığı görülmektedir. En yüksek oranda (%20) grafit kullanımında bile saf karışıma göre elastiklik özellikleri bakımından olumlu ya da olumsuz belirgin bir fark oluşmamıştır.



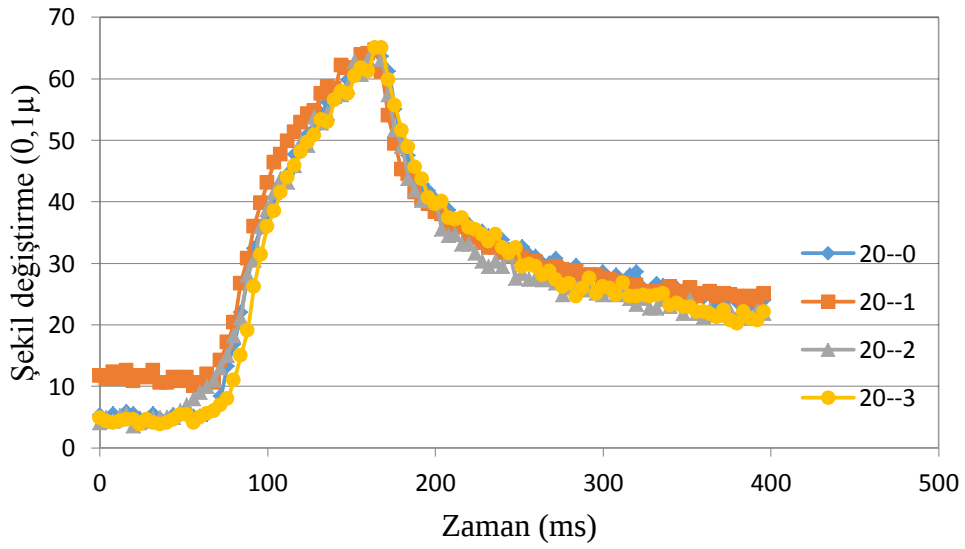
Şekil 5.23. Katkısız numunelerin zamana bağlı şekil değiştirme eğilimi



Şekil 5.24. %10 grafit katkılı numunelerin zamana bağlı şekil değiştirme eğilimi

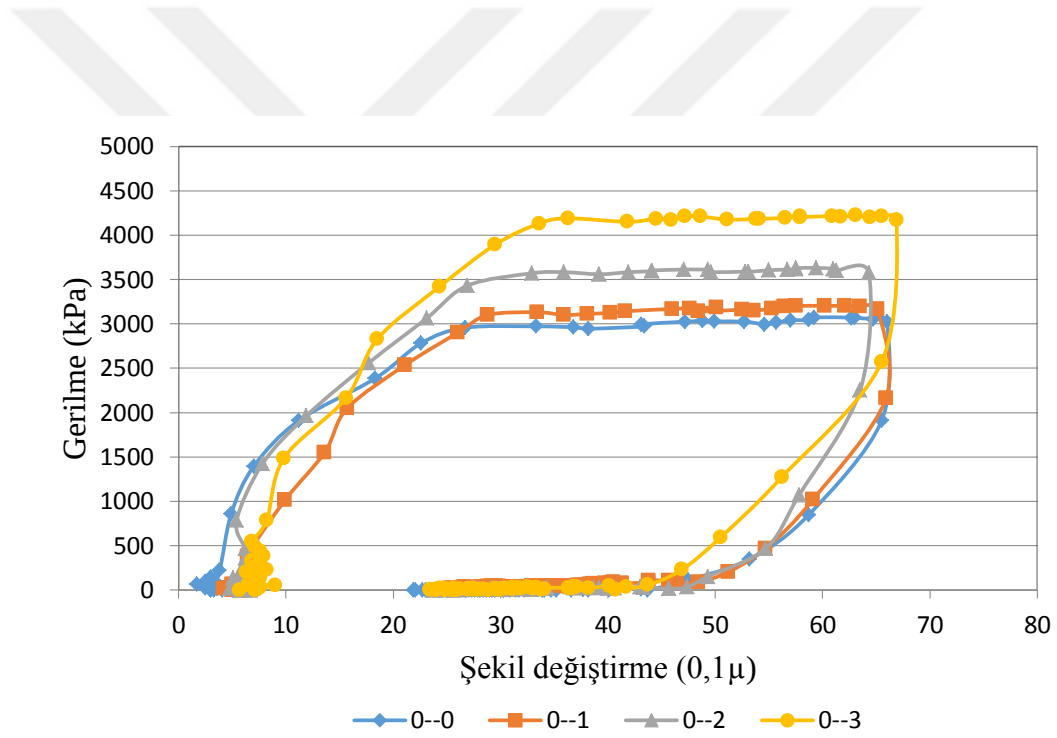


Şekil 5.25. %15 grafit katkılı numunelerin zamana bağılı şekil değıştirme eğilimi

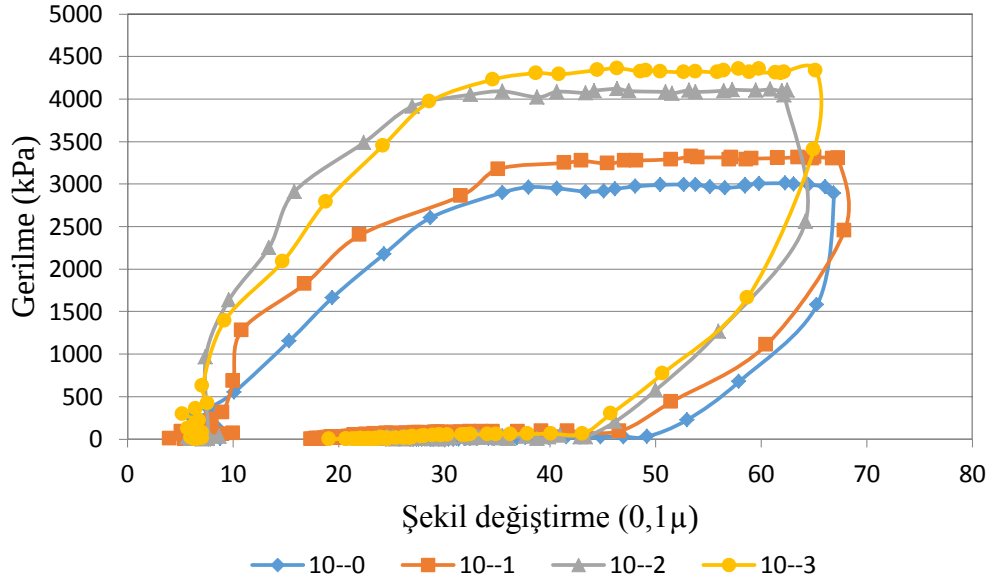


Şekil 5.26. %20 grafit katkılı numunelerin zamana bağılı şekil değıştirme eğilimi

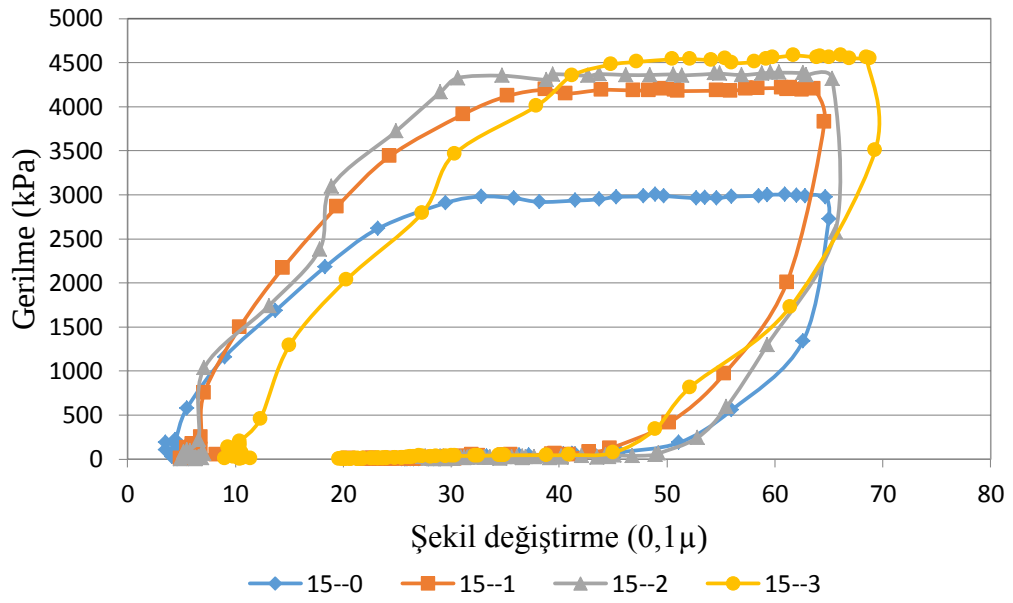
Şekil 5.27-5.30’da numunelerin gerilme-şekil değiştirme ilişkileri verilmiştir. Şekillerde 3000 ms’lik deney süresi içinde 150 ms etki eden yük ve dolayısıyla numunede meydana gelen şekil değiştirmelerin, yük kalktıktan sonra tamamının geri döndüğü görülmektedir. Yük-şekil değiştirme eğrilerinin altında kalan alan numunenin yük dağıtma kabiliyetinin bir ölçüsü olarak değerlendirilmektedir. Şekiller incelendiğinde yaşlandırma süresine bağlı olarak bu alanların önemli derecede değiştiği görülmektedir. Saf ve grafit katkılı bütün numunelerde yaşlandırma süresinin artması ile alanların arttığı özellikle 1.haftadan sonra alanların arttığı 2.ve 3. haftada oluşan alanların birbirine yakın olduğu tespit edilmiştir.



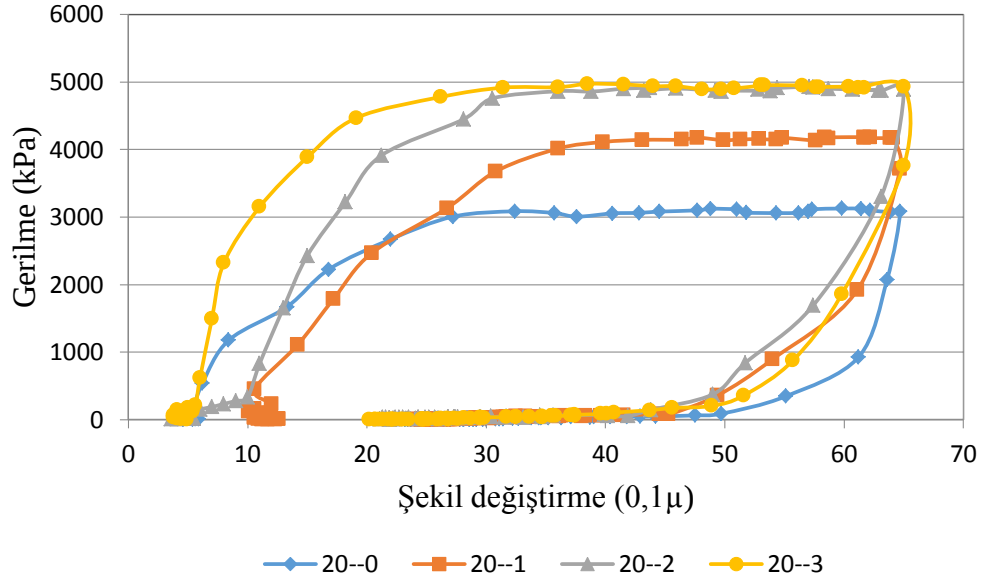
Şekil 5.27. Katkısız numunelerin gerilme-şekil değiştirme grafiği



Şekil 5.28. %10 grafit katkılı numunelerin gerilme-şekil değiştirme grafiği

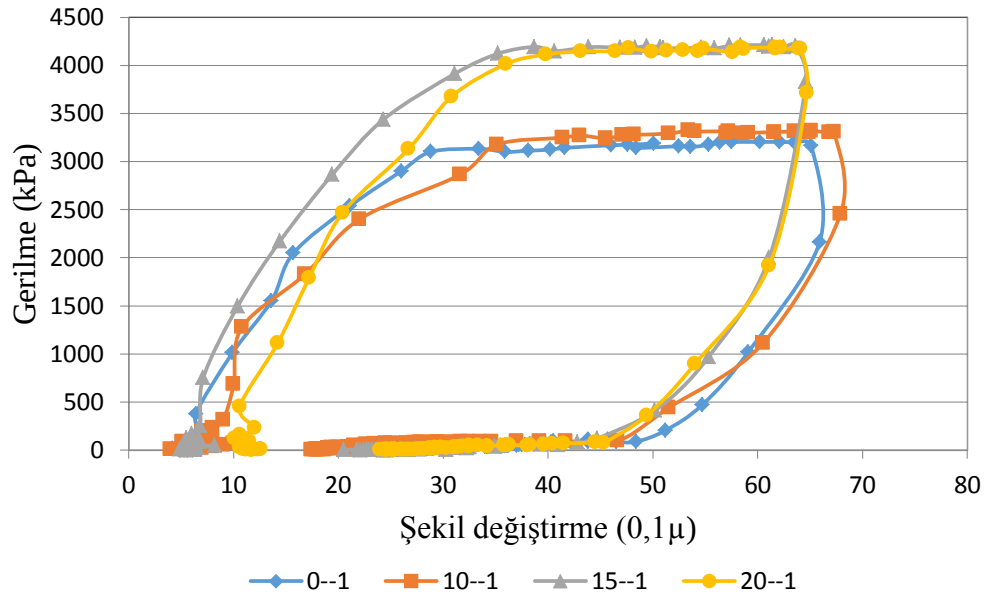
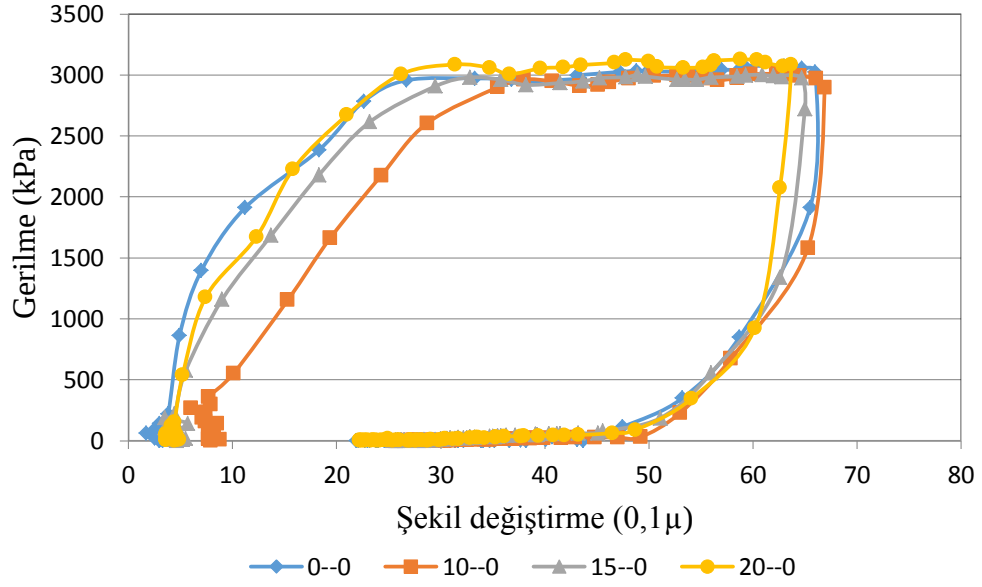


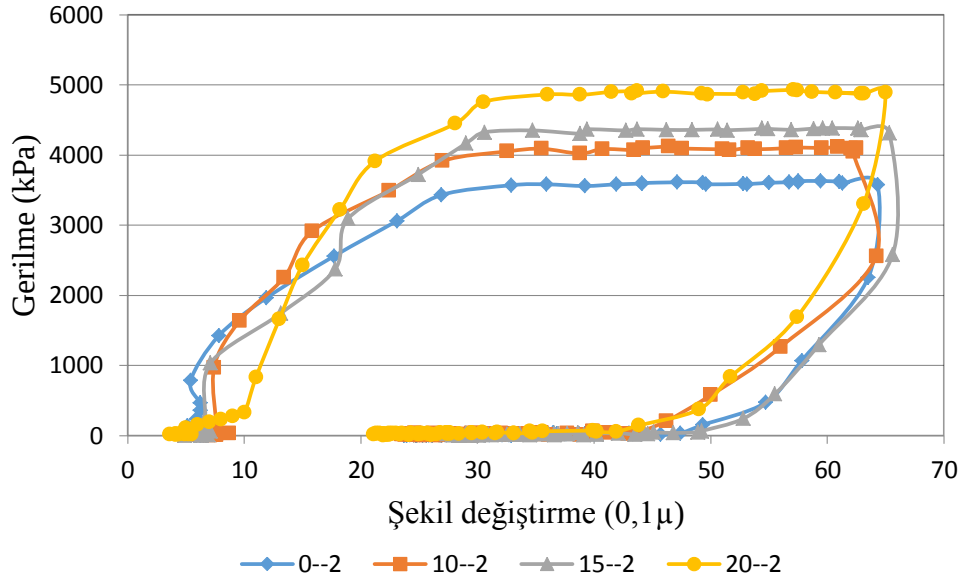
Şekil 5.29. %15 grafit katkılı numunelerin gerilme-şekil değiştirme grafiği



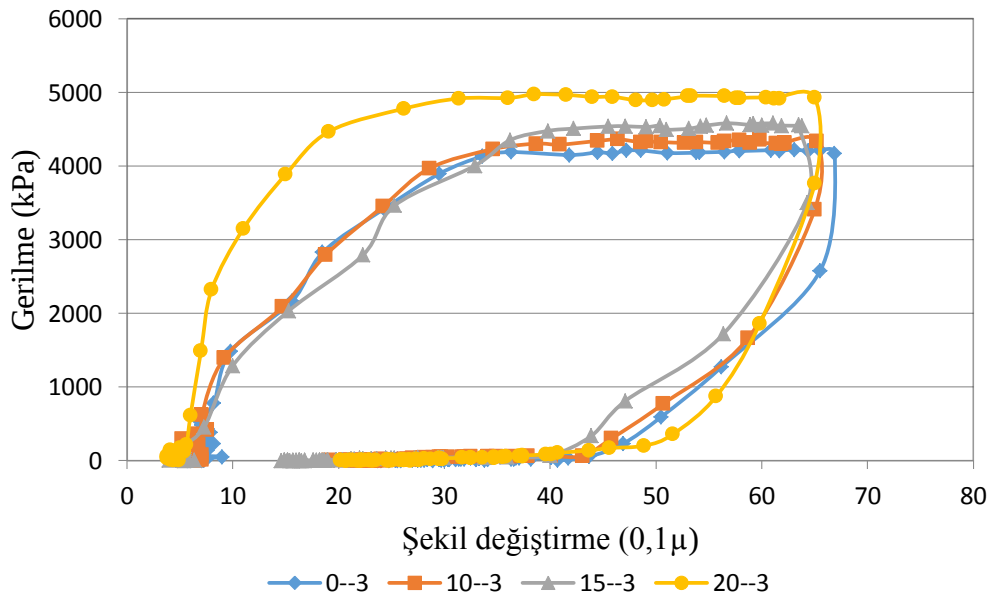
Şekil 5.30. %20 grafit katkılı numunelerin gerilme-şekil değiştirme grafiği

Grafit içeriğinin alanlar üzerindeki etkisini görmek amacıyla Şekil 5.31-5.34’de yük-şekil değiştirme eğrileri grafit içeriğine bağlı olarak verilmiştir. Hiç yaşlandırılmamış durumda saf ve grafit katkılı numunelerin alanları birbirine çok yakın çıkmaktadır. 1.haftada %10 grafit katkılı numune saf numuneye yakın bir performans gösterirken %15 ve %20 grafit katkılı numuneler birbirine yakın bir performans ancak saf karışımdan daha fazla alan sunmuşlardır. 2. haftada grafit içeriği ile orantılı bir şekilde alan değerleri artmaktadır. 3.hafta da ise %20 grafit katkılı numune hariç diğer bütün numuneler benzer performans sergilemiş birbirine yakın alan değerleri vermiştir.





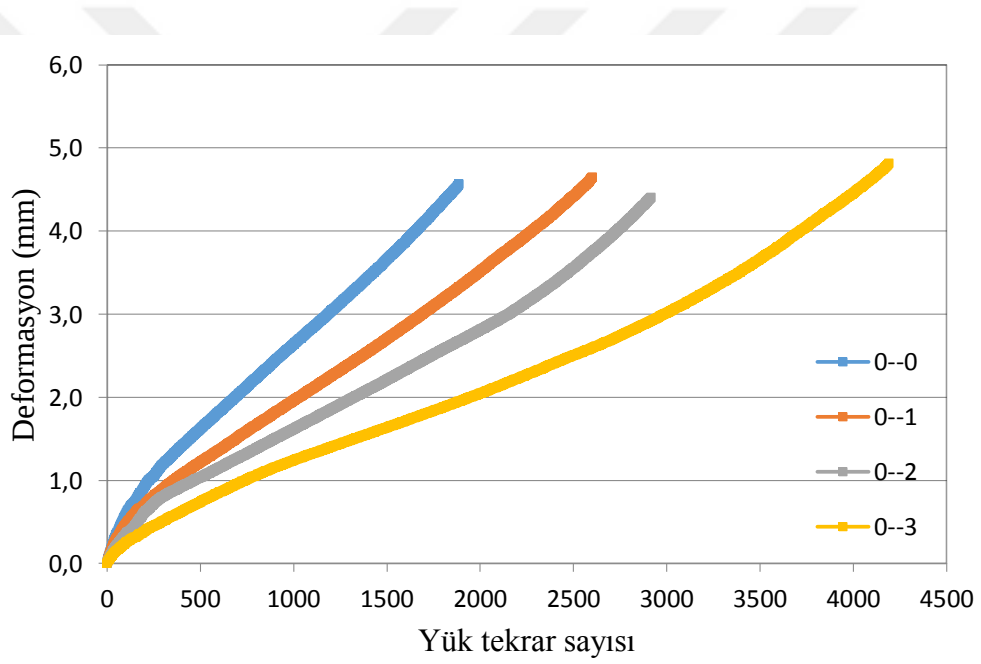
Şekil 5.33. 2 hafta yaşlandırılmış numunelerin gerilme-şekil değiştirme grafiği



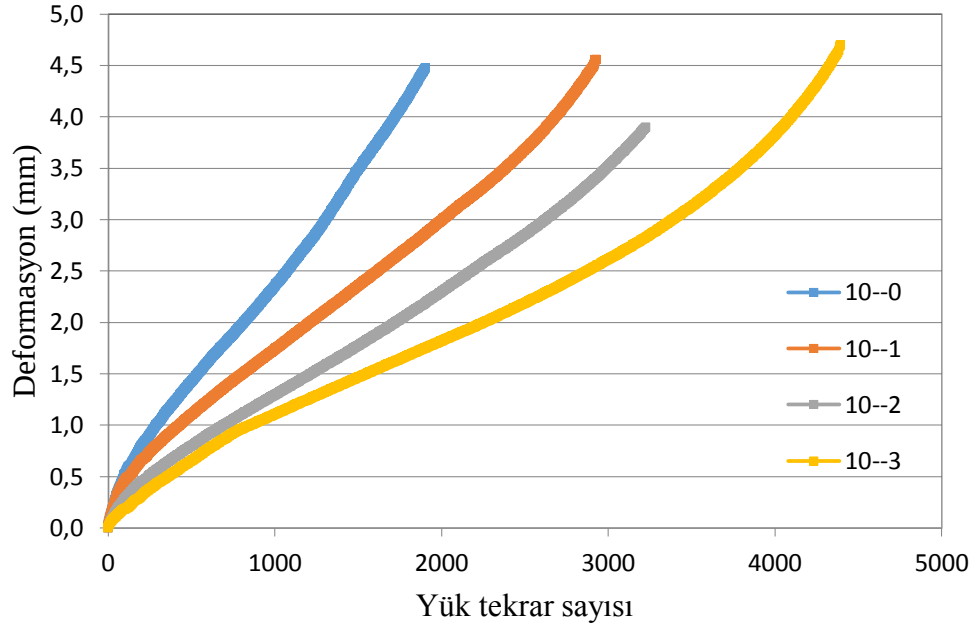
Şekil 5.34. 3 hafta yaşlandırılmış numunelerin gerilme-şekil değiştirme grafiği

5.2.3. İndirek Çekme Yorulma Deney Sonuçları

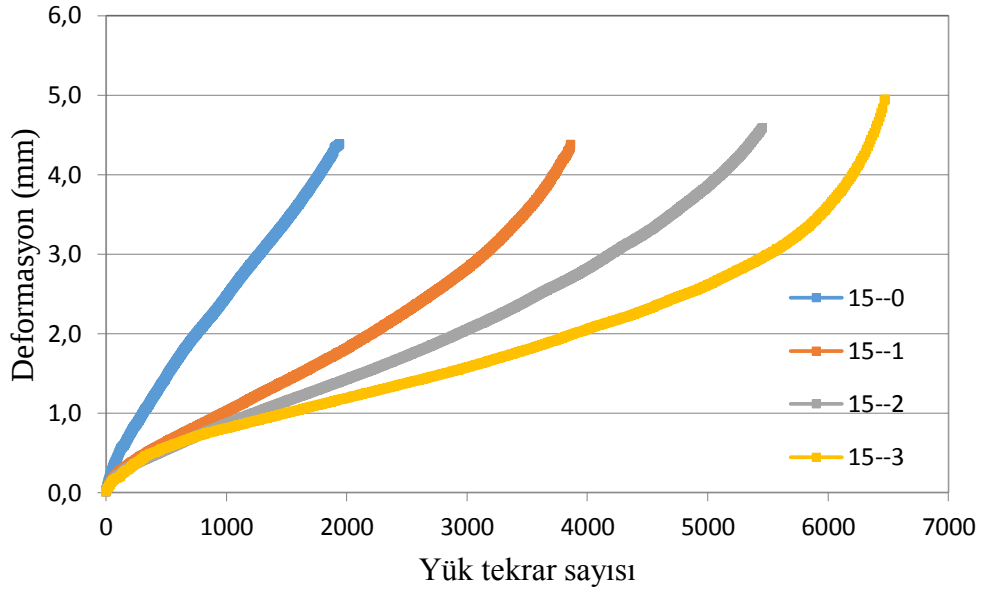
Yorulma deneyinde her bir karışım tipi için üç adet numune test edilmiştir. Gerilme seviyesi 350 kPa ve deney sıcaklığı 20°C olarak seçilmiştir. Şekil 5.35 - 5.38’de saf ve grafit katkılı numunelerin farklı yaşlandırma zamanlarındaki yük tekrarı – deformasyon ilişkisi verilmiştir. Buradaki eğriler her bir karışım tipi için deneye tabi tutulan üç numuneden ortalamaya en yakın olanına aittir.



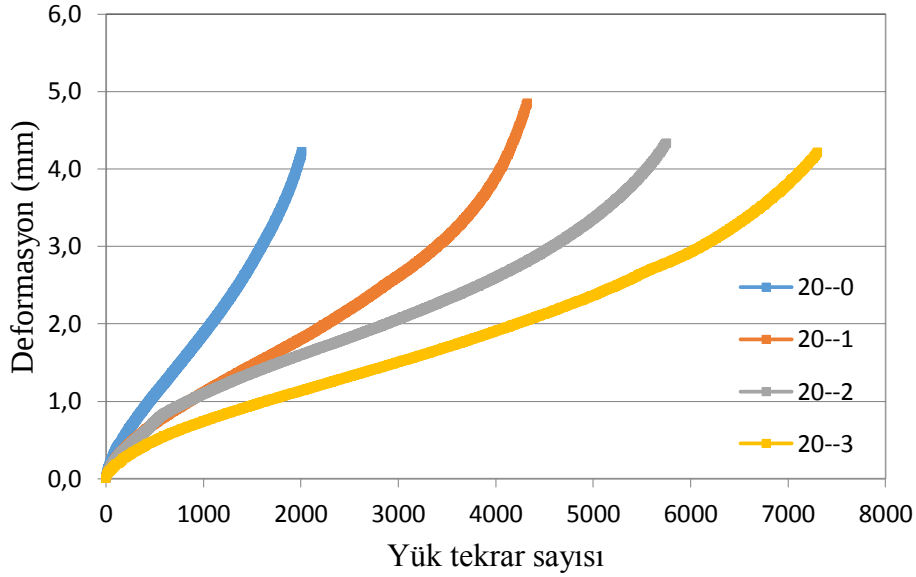
Şekil 5.35. Saf karışımların farklı yaşlanma sürelerindeki deformasyon eğilimi



Şekil 5.36. %10 grafit katkılı karışımların farklı yaşlanma sürelerindeki deformasyon eğilimi



Şekil 5.37. %15 grafit katkılı karışımların farklı yaşlanma sürelerindeki deformasyon eğilimi



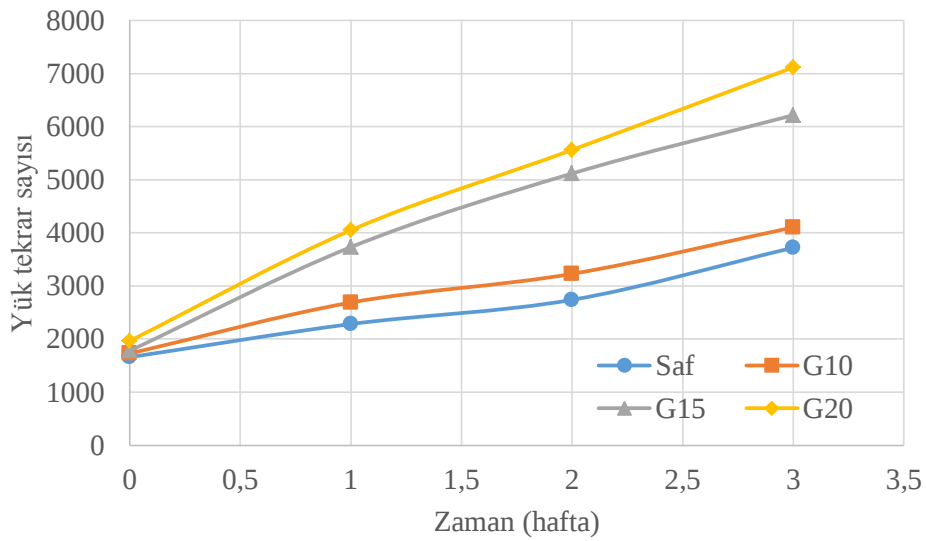
Şekil 5.38. %20 grafit katkılı karışımların farklı yaşlanma sürelerindeki deformasyon eğilimi

Şekillerden görüldüğü üzere bütün numuneler başlangıçta hızlı bir şekilde deformasyona uğramakta daha sonra deformasyon artış hızı lineer olarak devam etmekte ve daha sonra tekrar deformasyon hızı artmaktadır. Eğrilerin başındaki hızlı deformasyon artışı numunelerdeki hava boşluğu nedeni ile sıkışmasından kaynaklanmaktadır. Pekleşen numune belirli bir süre elastik davranış göstererek deformasyonların lineer olarak artmasına neden olmaktadır. Numunede çatlakların başlamasından sonra ise deformasyon artışı tekrar hızlanmaktadır. Saf karışımda üçüncü bölge olarak adlandırılan çatlak başlangıcından sonraki evrede numunelerin çok fazla yük almadığı hatta üçüncü bölgeye geçmeden kırılmanın meydana geldiği görülmektedir. Grafit katkılı numunelerde ise üçüncü bölge bariz bir şekilde oluşmaktadır. Diğer bir ifade ile çatlak başlangıcından sonra grafit katkılı numuneler çatlakların ilerlemesine daha fazla direnç göstermektedir.

Şekillerden görüldüğü üzere yaşlanma süresi arttıkça bütün numune tiplerinde yorulma yük tekrar sayısı önemli şekilde artmaktadır. Numuneler farklı deformasyon seviyelerinde kırıldıklarından, birbirleri arasında doğru bir karşılaştırma yapabilmek için bütün numunelerin ulaştığı en düşük deformasyon seviyesi olan 4 mm eşik değer olarak kabul edilmiştir. Tablo 5.11’de numunelerin 4 mm deformasyondaki ortalama yük tekrar sayıları ve Şekil 5.39’da ise değerlerin değişimi grafiksel olarak verilmiştir.

Tablo 5.11 Yorulma deney sonuçları.

	Saf		%10 grafit katkılı		%15 grafit katkılı		%20 grafit katkılı	
Yaşlandırılmamış	0-0	1659	G10-0	1728	G15-0	1779	G20-0	1965
1 hafta yaşlandırılmış	0-1	2283	G10-1	2688	G15-1	3732	G20-1	4050
2 hafta yaşlandırılmış	0-2	2739	G10-2	3228	G15-2	5118	G20-2	5562
3 hafta yaşlandırılmış	0-3	3720	G10-3	4104	G15-3	6216	G20-3	7116

**Şekil 5.39.** Yaşlandırma zamanına göre yük tekrar sayılarındaki değişim

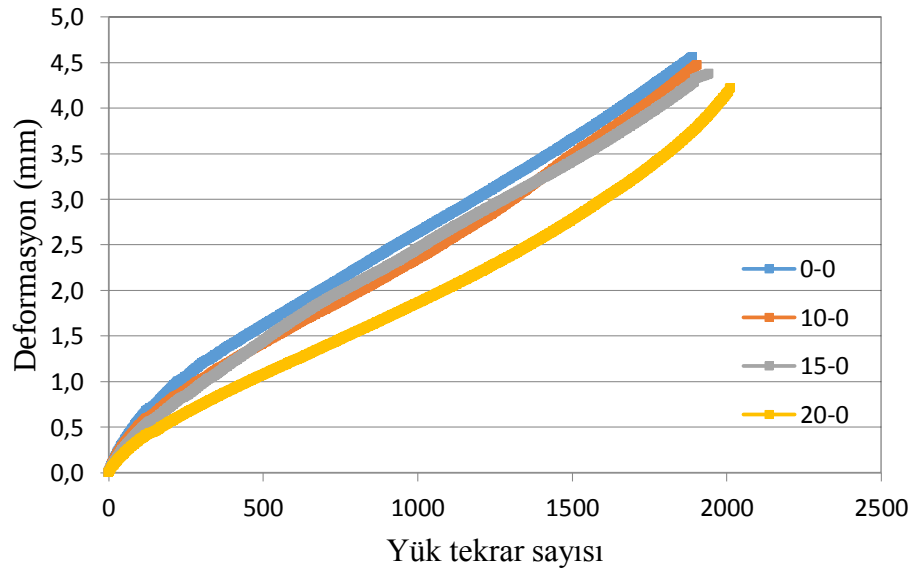
Her bir karışım numune tipinin kendi içinde yaşlanmadan nasıl etkilendiği incelendiğinde, saf karışımın 3 hafta yaşlandırılması yük tekrar sayısını %124 artırdığı; %10 grafit katkılı karışımın 3 hafta yaşlandırılması yük tekrar sayısını %137 artırdığı; %15 grafit katkılı karışımın 3 hafta yaşlandırılması yük tekrar sayısını %250 artırdığı ve %20 grafit katkılı karışımın 3 hafta yaşlandırılması yük tekrar sayısını %262 artırdığı tespit edilmiştir. Grafit içeriğinin artması ile numunelerde zamanla meydana gelen sertleşmenin arttığı dolayısıyla yük tekrar sayısının arttığı görülmektedir. Tablo 5.12’de saf ve katkı

karışımların 1, 2 ve 3 hafta yaşlandırmadan sonra sahip oldukları yük tekrar sayılarının yaşlandırmaya tabi tutulmayan numunenin yük tekrar sayısına oranı olan yaşlanma indeksleri verilmiştir.

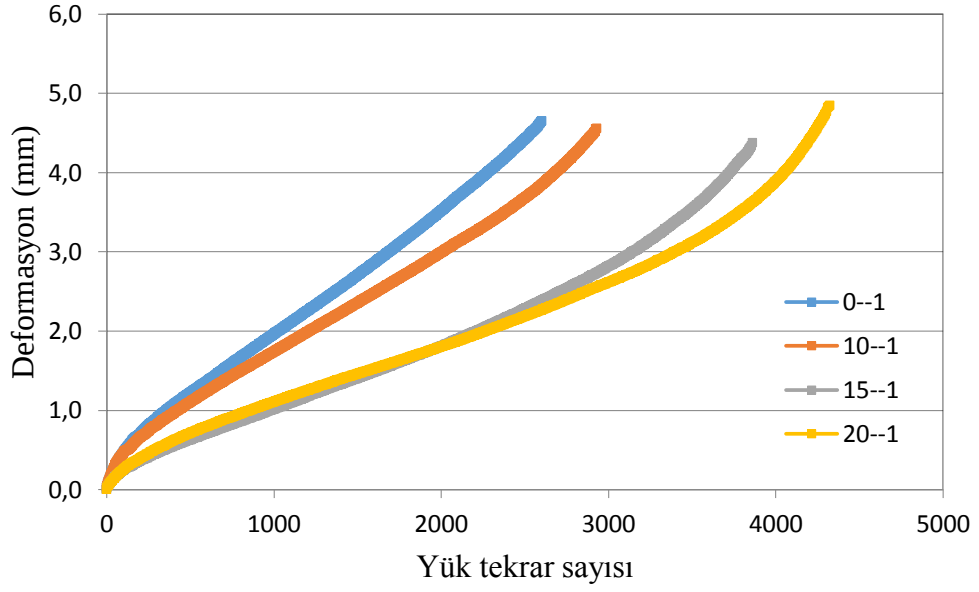
Tablo 5.12. Yaşlanmış numunelerin yük tekrar sayılarının yaşlandırılmamışlara oranı.

	Saf	%10 Grafit katkı	%15 Grafit katkı	%20 Grafit katkı
1. hafta	1,37	1,55	2,09	2,06
2. hafta	1,65	1,86	2,87	2,83
3.hafta	2,24	2,37	3,49	3,62

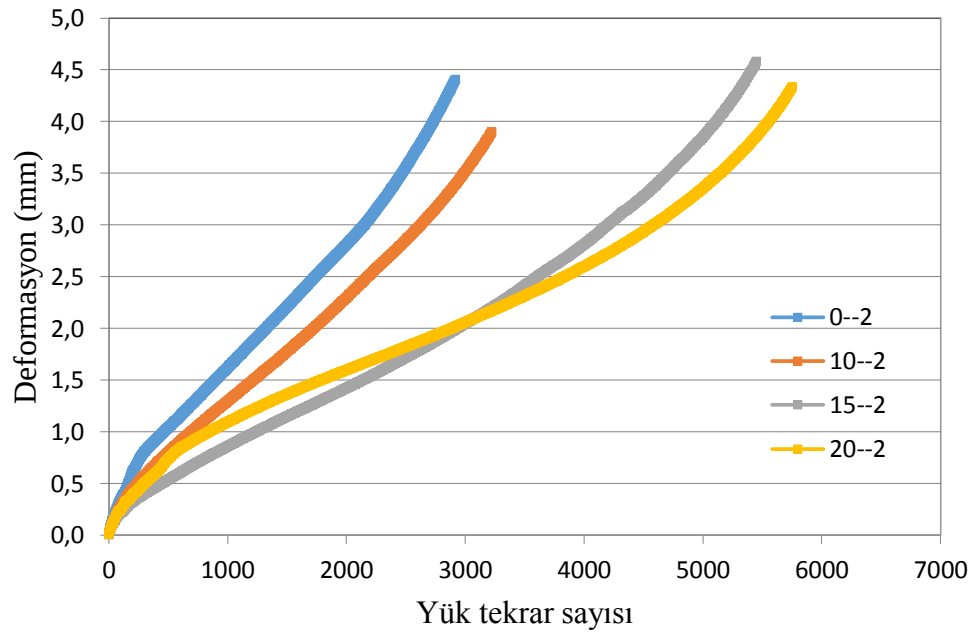
Grafit içeriğinin artması ile yaşlandırma zamanının yük tekrar sayısı üzerindeki etkisi artmaktadır. Saf karışım yaşlandırma süresinden daha az etkilenirken %20 grafit katkı karışım en fazla etkilenmektedir. Grafit katkı karışımlar saf karışıma göre daha fazla sertleşmekte ve dolayısıyla 20°C’de daha fazla yük tekrarı sağlamaktadır. Şekil 5.40-5.43’de saf ve grafit katkı numunelerin farklı grafit içeriğindeki yük tekrarı – deformasyon ilişkileri verilmiştir.



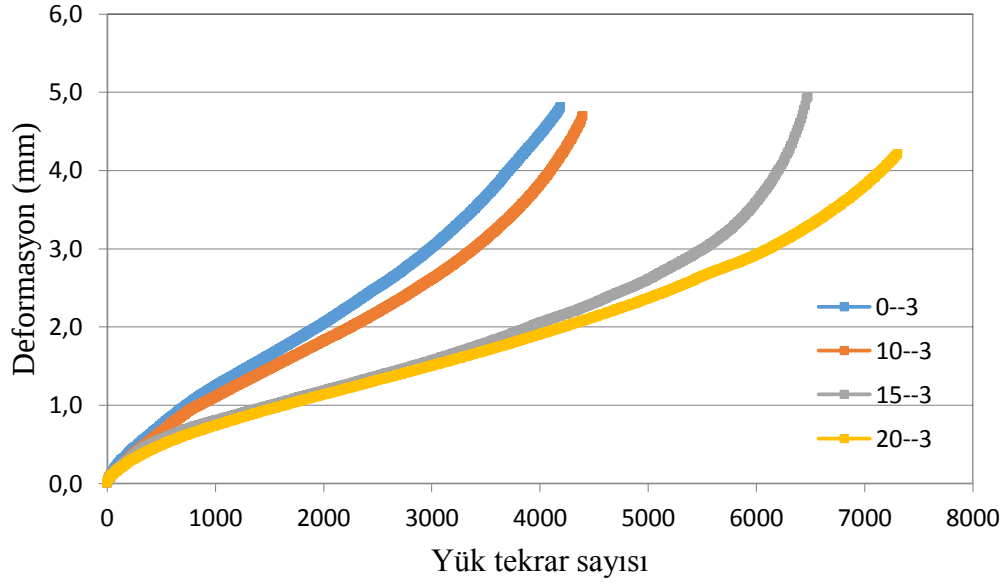
Şekil 5.40. Yaşlandırılmamış farklı grafit içeriğindeki karışımların deformasyon eğilimi



Şekil 5.41. 1 hafta yaşlandırılmış farklı grafit içeriğindeki karışımların deformasyon eğilimi

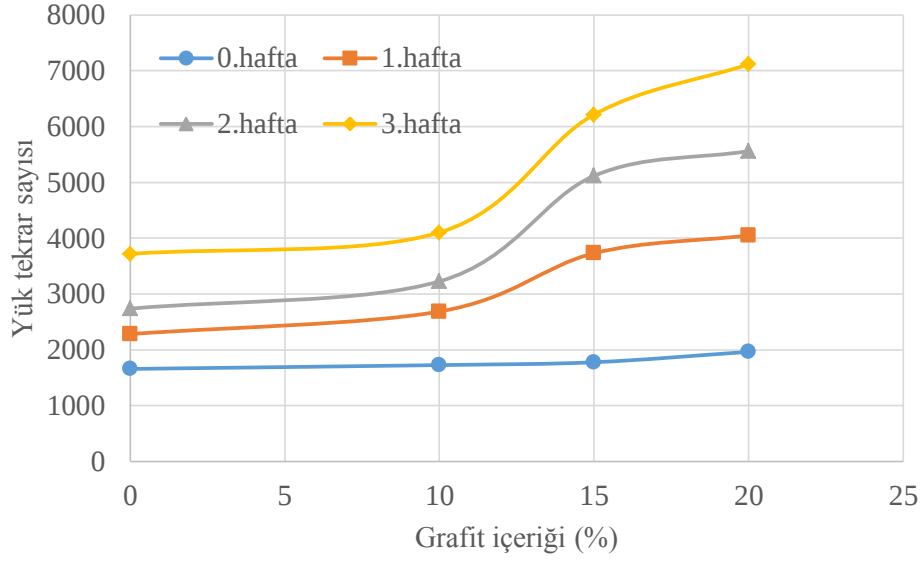


Şekil 5.42. 2 hafta yaşlandırılmış farklı grafit içeriğindeki karışımların deformasyon eğilimi



Şekil 5.43. 3 hafta yaşlandırılmış farklı grafit içeriğindeki karışımların deformasyon eğilimi

Şekiller incelendiğinde yaşlandırılmamış numunelerde grafit içeriğinin yük tekrarı üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı, yaşlandırma ile birlikte grafit içeriğinin artması ise yük tekrarının artması üzerinde önemli bir etki yapmaktadır. %10 grafit ilavesi 1, 2 ve 3 hafta yaşlandırmada saf karışıma yakın değerler verirken %15 ve %20 grafit ilavesi yük tekrar sayılarında önemli derecede artışa neden olmakta ayrıca bu iki grafit içeriğindeki numuneler birbirine yakın performans sergilemektedir. Şekil 5.44’de grafit içeriğinin farklı yaşlanma zamanlarında yük tekrarına olan etkileri verilmiştir.



Şekil 5.44. Grafit içeriğine göre yük tekrar sayılarındaki değişim

Yaşlanmamış numunelerde grafit içeriğinin %20 olması yük tekrar sayısını saf karışıma göre sadece %18 oranında artırırken, 1, 2 ve 3 hafta yaşlanmadan sonra sırasıyla 2,44; 3,35 ve 4,28 kat artmasına neden olmaktadır. Grafit oranının %10'dan daha fazla olması durumunda yorulma ömrünün önemli derecede arttığı görülmekte ancak bu etkinin tespit edilebilmesi için numunelerin yaşlanmaya tabi tutulması gerektiği ortaya çıkmıştır. Burada grafit katkılı numunelerin daha fazla yaşlandığı, diğer bir ifade ile yaşlanmadan daha fazla etkilendiği söylenebilir. Ancak 20°C'de yapılan yorulma deneyinde daha fazla yük tekrarı alan karışım tipinin trafiğin tekrarlı yüklerine daha uzun süre çatlamadan direnç göstereceği anlamına gelmektedir.

6. SONUÇ

Bu çalışmada bitümlü karışımların termal özellikleri iyileştirmek için kullanılan grafitin bitümün ve taş mastik asfalt karışımının özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Bağlayıcı ağırlığınca %7, %10, %13 ve %16 olmak üzere toplam dört farklı oranda grafit ile modifiye edilen bağlayıcılara penetrasyon, yumuşama noktası, dönel viskozimetre, dinamik kayma reometresi ve kırılgan eğme reometresi deneyleri uygulanmıştır. Daha sonra ise saf, %10, %15 ve %20 grafit modifiyeli bağlayıcılar kullanılarak taş mastik asfalt karışımlar hazırlanmıştır. Bu karışımlara Marshall stabilite, indirek çekme rijitlik modülü ve indirek çekme yorulma deneyleri uygulanmıştır.

Grafit ilavesi bağlayıcıların penetrasyon değerlerini azaltmıştır. En fazla azalış %20.7 ile %16 grafit modifikasyonunda olmuştur. Yumuşama noktası değerleri grafit ilavesi ile artmakta ancak en fazla artışın görüldüğü en yüksek grafit modifiyeli bağlayıcıda bile bu artış sadece 2°C olmaktadır. Penetrasyon indeksi değerlerine göre grafit ilavesi bağlayıcının ısıya karşı hassasiyetini saf bağlayıcıya göre artırmakta ancak yine de normal kabul edilen -1 değerinden daha düşük değerler vermemektedir. Grafit ilavesi viskozite değerlerinin artmasına neden olarak karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarını artırmıştır. En yüksek oranda grafit kullanımı bu değerleri yaklaşık 8°C artırmaktadır. %16 oranında grafit ilavesi saf bağlayıcının tekerlek izi parametresini %21 artırmakta ve buna karşın faz açısı değerlerini değiştirmemektedir. BBR deneyine göre; grafit içeriğinin artması ile deformasyon azalmakta ve rijitlik artarken m-değerlerinde önemli bir değişiklik olmamaktadır.

Saf, %10, %15 ve %20 grafit içeriğindeki orijinal ve 1,2,3 hafta yaşlandırılmış numunelere ait zamana bağlı olarak şekil değiştirme davranışı incelendiğinde aralarında belirgin bir farkın olmadığı belirlenmiştir. Saf ve grafit katkılı bütün numunelerde yaşlandırma süresinin artması ile rijitlik modülü değerlerinin arttığı tespit edilmiştir. Son olarak grafit içeriğinin artması ile numunelerde zamanla meydana gelen sertleşmenin arttığı dolayısıyla yük tekrar sayısının arttığı belirlenmiştir. Bütün deneyler birlikte düşünüldüğünde %10-15 oranındaki grafit içeriğinin etkili bir oran olduğu tespit edilmiştir.

KAYNAKLAR

1. **Adedeji, A. Grunfelder, T. Bates, F.S. Macosko, C.W. Stroup-Gardiner, M. Newcomb, D.E.**, 1996. Asphalt modified by SBS triblock copolymer: Structures and properties. *Polym Eng Sci*, **36**, 1707–1723.
2. **Akmal, N. Usmani, A.M.**, 1999. Application of asphalt-containing materials. *Polym News*, **24**, 136–140.
3. **Aksoy, A. Samlıoğlu, K. Tayfur, S. ve Özen, H.**, 2005. Effects of various additives on the moisture damage sensitivity of asphalt mixtures, *Construction and Building Materials*, **19(1)**, 11-18.
4. **Altaş, Ö.Y.**, 2002. Bitümlü malzemeler ve karışım şartnamelerinin karşılaştırılması, *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
5. **Avcı, E.**, 2009. Sıcak iklimli bölgelerde kullanılan asfalt betonu karışım değişkenlerinin kaplama tabakası performansına etkisi, *Yüksek Lisans Tezi*, S.D.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
6. **Bahia, H.U. ve Anderson, D.A.**, 1995. Strategic highway research program binder rheological parameters: Background and comparison with conventional properties, Transportation Research Record 1488, TRB, *National Research Council*, Washington, DC, 32-39.
7. **Bardesi, A. ve Brule, B.**, 1999. Use of modified bituminous binders, special bitumens and bitumens with additives in road pavements, *World Road Association (PIARC)*, 118-120.
8. **Bell, C.A. Sosnovske, D. Wieder, J.A.**, 1992. Aging, Binder Validation, *National Research Council*, Washington D.C., 384-385.
9. **Blazejowski, K.**, 2010. Stone matrix asphalt-theory and practice, *CRC Press*, Taylor & Francis Group, U.S.
10. **Çetin, S.**, 2007. Afyonkarahisar bölgesi volkanik kayaların sıcak karışım asfalt kaplamalarında agrega olarak kullanılabilirliğinin araştırılması, *Yüksek Lisans Tezi*, A.K.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon.
11. **Çetinkaya, R.**, 2013. Almanya da asfalt yol yapımında kalite kontrol sistemleri, *6.Ulusal Asfalt Sempozyumu ve Sergisi*, Ankara.

12. **Çolak, K.M.**, 2006. Asphalt kaplamalarda sinerjetik fayda konusunun anlaşılmasında Marshall oranı yaklaşımının kullanılması, *Yüksek Lisans Tezi*, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
13. **Du, Y. Wang, S.**, 2015. Oriented heat release in asphalt pavement induced by high-thermal-conductivity rods. *Appl. Therm. Eng.*, **90**, 424–431.
14. **Francken, L.**, 1998. Bituminous binders and mixes, Rilem Reports, E & FN Spon, London and New York.
15. **Gennis, R.B. Shuler, S. Bahia, H.U.**, 1994. Background of Superpave Asphalt Binder Test Methods, National Asphalt Training Center Demonstration Project 101, Publication No. FHWA-SA-94-069, Asphalt Institute, Lexington, KY, 104p.
16. **Giriş, Ü.**, 2007. Esnek üstyapılar ile rijit üstyapıların teknik ve ekonomik yönden karşılaştırılması, *Yüksek Lisans Tezi*, G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
17. **Güngör, A.G. Orhan F. ve Kaşak S.**, 2009. Bitümlü sıcak karışım aşınma tabakalarının performanslarının ileri deneyler ile belirlenmesi, 5. *Ulusal Asphalt Sempozyumu*, Ankara, 18-19 Kasım.
18. **Gürer, C.**, 2005. Atık mermer parçalarının yol kaplamasında değerlendirilmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon.
19. **Hinislioğlu, S., Ağar, E.**, 2004. Use of waste high density polyethylene as bitumen modifier in asphalt concrete mix. *Materials Letters*, 58(3-4).
20. **Ilıcalı, M.**, 2001. Asphalt ve Uygulamaları, İSFALT Bilimsel Yayınları, No: 1, 280 s., İstanbul.
21. **Karayolları Genel Müdürlüğü**, 2011. Karayolları Modifiye Bitüm Teknik Şartnamesi, Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı, Üstyapı Şubesi Müdürlüğü
22. **Kök, V.B.**, 2007. Bitümlü sıcak karışımların üretiminde yeni bir karıştırma yönteminin araştırılması. *Doktora Tezi*, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
23. **Kuloğlu, N.**, 2001. Bitüm ve bitümlü sıcak karışımların rijitliğine etki eden parametreler, TÜBİTAK, *Türk Mühendislik ve Çevre Bilimleri Dergisi*, **25**, 61-67.
24. **Lav, A.H. ve Lav, M.A.**, 2004. Shell Bitüm El Kitabı, İSFALT Bilimsel Yayınları, No:3, 334 s., İstanbul.

25. **Liu, J. ve Li, P.**, 2008. Experimental study on gilsonite-modified asphalt, *Proceeding of the 2008 Airfield and Highway Pavement Specialty Conference*, Washington, 222-228.
26. **Liu, X. Liu, W. Wu, S. Wang, C.**, 2014. Effect of carbon fillers on electrical and road properties of conductive asphalt materials, *Constr. Build. Mater.*, **68**, 301–306.
27. **Lu, X. Isacsson, U.**, 1997. Rheological characterization of styrene-butadienestyrene copolymer modified bitumens, *Journal of Construction and Building Materials*, **11(1)**, 23–32.
28. **Molenaar, A.A.A. ve Medani, T.O.**, 2000. Rational testing methods for performance based specifications, *Proceedings of the 1st International Conference World of Asphalt Pavements*, Sydney, Australia, July 7-10, 484-500.
29. **Orhan, F.**, 2011. Bitümlü Karışımlar Laboratuvarı Çalışmaları, *Karayolları Genel Müdürlüğü Yayınları*, Ankara.
30. **Orhan, F.**, 2012. Bitümlü karışımlar laboratuvarı çalışmaları, Ar-Ge Dairesi Başkanlığı Üstyapı Geliştirme Şube Müdürlüğü, KGM, Ankara.
31. **Öztürk, A. Çubuk, K.M.**, 2004. Karayolu esnek üstyapı tasarımında yeni bir yöntem: Yüksek performanslı asfalt kaplama, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, **19(2)**, 175-184.
32. **Pan, P. Wu, S. Xiao, Y. Wang, P. Liu, X.**, 2014. Influence of graphite on the thermal characteristics and anti-ageing properties of asphalt binder, *Constr. Build. Mater.*, **68**, 220–226.
33. **Petersen, J.C. Robertson, R.E. Branthaver, J.F. et.al.**, 1994. Binder Characterization and Evaluation Volume 4: Test Methods, SHRP-A-370, Strategic Highway Research Program National Research Council, Washington, DC.
34. **Sağlık, A. ve Güngör, A.G.**, 2008. Karayolları esnek üstyapılar projelendirme rehberi, *Karayolları Genel Müdürlüğü Yayınları*, Ankara.
35. **Simms, S.A.**, 1998. Use of coal fly ash in asphalt concrete mixes, *MSc Thesis*, Dalhousie University, Daltech, Canada.
36. **Subagio, B.S. Siswosoebrotho, B.I. ve Karsaman, R.H.**, 2003. Development of Laboratory Performance of Indonesian Rock Asphalt (Asbuton) in Hot Rolled Asphalt Mix, *Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 436-449.

37. **Tunç, A.**, 2001. Yol Malzemeleri ve Uygulamaları, Atlas Yayınevi, İstanbul.
38. **Tunç, A.**, 2004. Esnek Kaplama Malzemeleri El Kitabı, Asil Yayın Dağıtım, Ankara.
39. URL-1, http://www.mod.uk/NR/rdonlyres/2AED7CD6-ADE1-46A9-A290-9069A89F32CA/0/spec_13.pdf., Marshall Asphalt for Airfields, Ministry of Defence, Construction Support Team, England, Specification 13, 22.06.2013.
40. **Whiteoak, D. ve Read, J.**, 2003. The Shell Bitumen Handbook, Thomas Telford Ltd, London.
41. **Yao, H. Dai, Q. You, Z. Ye, M. Yap, Y.K.**, 2016. Rheological properties, low-temperature cracking resistance, and optical performance of exfoliated graphite nanoplatelets modified asphalt binder, *Constr. Build. Mater.*, **113**, 988–996.
42. **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, 61-72.
43. **Yildirim, Y. Solaimanian, M. Kennedy, T.W.**, 2000. Mixing and compaction temperatures for hot mix asphalt concrete, Report No. 1250-5, *Center for Transportation Research*, The University of Texas at Austin, Austin.
44. **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.
45. **Zaniewski, J.P. ve Pumphrey, M.E.**, 2004. Evaluation of performance graded asphalt binder equipment and testing protocol, *Asphalt Technology Program*, Morgantown, West Virginia.
46. **Zoorob, S.E. ve Suparna, L.B.**, 2000. Laboratory design and investigation of the properties of continuously graded asphaltic concrete containing recycled plastics aggregate replacement (plastiphalt), *Cement&Concrete Composites*, **22**, 233-242.

ÖZGEÇMİŞ

Yunus ERKUŞ, 1989 yılında Elazığ'da doğmuştur. İlkokulu, ortaokulu ve liseyi Elazığ'da tamamlamıştır.

2008 yılında girdiği Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nden 2012 yılında mezun olmuştur. 2013 yılında Bingöl Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Mimarlık Bölümü'ne Araştırma Görevlisi olarak atanmıştır. Aynı yıl ÖYP kapsamında yabancı dil eğitimi almak üzere Gazi Üniversitesi'nde görevlendirilmiştir. 2014 yılında Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nde yüksek lisans eğitimine başlamıştır. 2015 yılında Bingöl Üniversitesi'ndeki görevinden istifa edip Fırat Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'ne Araştırma Görevlisi olarak atanmıştır. Aynı yıl Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nde yüksek lisans eğitimine başlamıştır.