

Nano Malzemelerin Bitümlü Sıcak Karışımların Marshall ve Superpave Karakteristikleri
Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması ve Modellenmesi

Anıl Öcal

DOKTORA TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Nisan 2018

Investigation and Modeling of the Effects of Nano Materials on the Marshall
and Superpave Characteristics

Anıl Öcal

DOCTORAL DISSERTATION

Department of Civil Engineering

April 2018

Nano Malzemelerin Bitümlü Sıcak Karışımların Marshall ve Superpave Karakteristikleri
Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması ve Modellenmesi

Anıl Öcal

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Ulaştırma Bilim Dalında
DOKTORA TEZİ
Olarak Hazırlanmıştır

Danışman: Doç.Dr. Murat KARACASU

Nisan 2018

ONAY

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Doktora öğrencisi Anıl Öcal'ın DOKTORA tezi olarak hazırladığı "Nano Malzemelerin Bitümlü Sıcak Karışımların Marshall ve Superpave Karakteristikleri Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması ve Modellenmesi" başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek oybirliği ile kabul edilmiştir.

Danışman : Doç.Dr. Murat Karacasu

İkinci Danışman : --

Doktora Tez Savunma Jürisi :

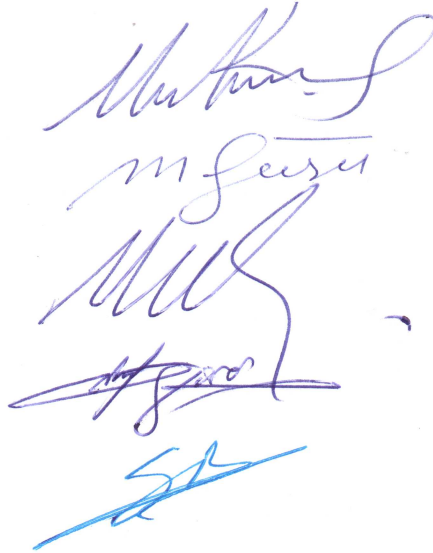
Üye: Doç. Dr. Murat Karacasu

Üye: Prof. Dr. Metin Gürü

Üye: Prof. Dr. Hüseyin Akbulut

Üye: Doç. Dr. Cahit Gürer

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Şafak Bilgiç



Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun tarih ve
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Hürriyet ERŞAHAN

Enstitü Müdürü

ETİK BEYAN

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre Doç.Dr. Murat KARACASU danışmanlığında hazırlamış olduğum “Nano Malzemelerin Bitümlü Sıcak Karışımların Marshall ve Superpave Karakteristikleri Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması ve Modellenmesi” başlıklı tezimin özgün bir çalışma olduğunu; tez çalışmamın tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; tezimde verdiğim bilgileri, verileri akademik ve bilimsel etik ilke ve kurallara uygun olarak elde ettiğimi; tez çalışmamda yararlandığım eserlerin tümüne atıf yaptığımı ve kaynak gösterdiğimi ve bilgi, belge ve sonuçları bilimsel etik ilke ve kurallara göre sunduğumu beyan ederim. 20/04/2018

Anıl Öcal

ÖZET

Bu çalışmada bitümün nano malzemeler ile modifiye edilmesi neticesinde; modifiye bitüm ve bitümlü sıcak karışımın (BSK) sıcak bölgelerdeki tekerlek izi ve yorulma dayanım performansının geliştirilmesi amaçlanmıştır. 50/70 penetrasyonlu normal bitümü modifiye etmek amacıyla katkı malzemesi olarak nano magnezyum spinel oksit (NMS) ve kolemanit (NK) kullanılmıştır. Mikro boyuttaki katkı maddeleri mekanik aşındırma yöntemiyle dane çapı nano boyuta (180-200 nm) gelecek şekilde öğütülmüştür. Bitüm ağırlığınca %1, 3, 5 ve 8 katkı oranlarında modifiye bitüm numuneleri ve %5 olarak tespit edilen optimum katkı oranında BSK numuneleri hazırlanmıştır.

Superpave bitüm deney sonuçlarından, her iki katkı malzemesi ile yapılan modifiye işlemi neticesinde bitümün yüksek sıcaklıklarda tekerlek izi ve orta sıcaklıklarda yorulma dayanımının önemli ölçüde arttığı tespit edilmiştir. Her iki katkı bitüme %8 oranında ilave edildiğinde; normal bitüme göre yenilme sıcaklığında yaklaşık 4°C artış sağlanmıştır. DSR deneyinden elde edilen sonuçlar, %5 NMS ve %5 NK ile bitümün modifiyesi neticesinde, 25°C sıcaklıkta, numunelerin yorulma direnç parametresindeki azalmanın sırasıyla %46 ve %60 olduğunu göstermektedir.

Superpave karışım tasarım yönteminde malzeme seçimi (bitüm ve agrega) ve karışım tasarımı yapılırken uygulama bölgesi olarak Antalya ili seçilmiştir. Antalya özellikle yaz aylarında en yüksek sıcaklığın yaşandığı ildir. Superpave yöntemine göre yağurmalı sıkıştırıcı ile dökülecek BSK numunelerinde kullanılacak optimum bitüm oranları Marshall yöntemine göre tespit edilmiştir. Bu bağlamda, normal bitüm için optimum bitüm oranı %4,50; NMS için %4,47 ve NK için %4,60 olarak bulunmuştur. Superpave yöntemine göre normal, NMS ve NK katkılı BSK numuneleri için optimum bitüm oranları sırasıyla, %4,28; %4,21 ve %4,33 olarak tespit edilmiştir. Çalışma sonunda nano malzemelerin kullanımı ile BSK'ların performanslarının arttırılabileceği ispatlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Modifiye bitüm, nano spinel oksit, nano kolemanit, tekerlek izi, yorulma

SUMMARY

In this study, as a result of bitumen modification with nano materials, it is aimed to improve bitumen and asphalt concrete fatigue strength performance and the rutting strength in hot regions. Additives such as nano magnesium spinel oxide (NMS) and colemanite (NK) are used for modifying 50/70 penetration normal bitumen. The additives at the micro size are milled until the desired nano particle size (180-200 nm) with mechanical abrasion method. Modified bitumen specimens with additive ratios of %1, 3, 5 and 8 by weight of the bitumen and asphalt concrete samples with the determined %5 optimum additive content are prepared.

According to the Superpave bitumen test results, the modification process with the addition of each material significantly increased the rutting strength of bitumen at high temperatures and the fatigue strength at the intermediate temperatures. When both additives are added to the bitumen at %8, failure temperature is increased approximately 4°C compared with normal bitumen. According to the DSR test results, at 25°C test temperature, the decrease in the fatigue resistance parameter for the samples modified with % 5 NMS and %5 NK are %46 and %60 respectively.

In the Superpave mixture design method, while choosing the materials (bitumen and aggregate) and making the mixture design, the Antalya province was chosen as the application area. Antalya is the province which is experiencing the highest temperatures especially in the summer months. The optimum bitumen content in Superpave method for preparing the asphalt concrete specimens with the gyratory compactor is determined according to Marshall method. In this context, the optimum bitumen content for normal bitumen was %4,50; %4,47 for NMS and %4,60 for NK. According to the Superpave method, the optimum bitumen contents for normal, NMS and NK modified asphalt concrete specimens are determined as %4,28; %4,21 and %4,33 respectively. At the end of the study, it has been proved that the performance of asphalt concrete can be increased with the use of nano materials.

Keywords: Modified bitumen, nano spinel oxide, nano colemanite, rutting, fatigue

TEŞEKKÜR

Bu çalışmayı tamamlayabilmem için bana desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen danışman hocam Doç. Dr. Murat KARACASU'ya öncelikle teşekkür ederim. Çalışma kapsamında kullandığım katkıları bana tavsiye eden ve Gazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Kimya Mühendisliği laboratuvarlarında çalışma yapmama müsaade eden çok kıymetli hocam Prof. Dr. Metin GÜRÜ'ye çok teşekkür ederim. Tez izleme sınavlarımın tamamına katılan ve desteğini esirgemeyerek çalışma kapsamında yapılması gerekenler konusunda yönlendirici olan Prof. Dr. Hüseyin AKBULUT ve Dr. Öğr. Görevlisi Şafak BİLGİÇ'e, istatistik analizlerin yapılmasında yardımcı olan Doç. Dr. Arzu ALTIN YAVUZ ve Araş.Gör. Kadir Berkhan AKALIN'a teşekkür ederim.

Deneyisel çalışmalar için laboratuvarlarını bana açan Karayolları 2'nci ve 4'üncü Bölge Müdürlükleri Araştırma ve Geliştirme Başmühendisliklerine teşekkürü borç bilirim.

Yaptığım çalışmalar boyunca anlayışlı olan ve her zaman destek olan eşim Duygu ÖCAL'a, bugünlere gelmemde büyük paya sahip olan annem Vicdan Neşe ÖCAL ve babam Adnan ÖCAL'a sonsuz teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	vi
SUMMARY	vii
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xvi
ÇİZELGELER DİZİNİ	xx
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xxv
1. GİRİŞ VE AMAÇ	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	7
3. BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIMLAR.....	16
3.1. Agregalar.....	16
3.1.1. Agregaların sınıflandırılması	17
3.1.1.1. <u>Mineralojik sınıflandırma</u>	17
3.1.1.2. <u>Boyut sınıflandırması</u>	18
3.1.1.3. <u>Gradasyon (Dane dağılımı) sınıflandırması</u>	18
3.1.1.4. <u>Biçim sınıflandırması</u>	19
3.1.1.5. <u>Yüzey yapısı sınıflandırması</u>	20
3.1.1.6. <u>Porozite sınıflandırması</u>	21
3.1.1.7. <u>Özgül ağırlık sınıflandırması</u>	21
3.1.2. Agregaların fiziksel özellikleri	23
3.1.3. Agregalara uygulanan deneyler	27
3.1.3.1. <u>Elek analizi deneyi</u>	28
3.1.3.2. <u>Aşınma (Los Angeles) deneyi</u>	29
3.1.3.3. <u>Mikro-deval (Aşınma kaybı) deneyi</u>	31
3.1.3.4. <u>İri agregalar özgül ağırlık ve su emme deneyi</u>	32
3.1.3.5. <u>İnce agregalar özgül ağırlık ve su emme deneyi</u>	33
3.1.3.6. <u>Filler agregalar özgül ağırlık deneyi</u>	35
3.1.3.7. <u>Agregalar birim hacim ağırlık deneyi</u>	36
3.1.3.8. <u>Yassılık indeksi deneyi</u>	36
3.1.3.9. <u>Donma çözülme deneyi</u>	37
3.1.3.10. <u>Agregada organik madde tayini deneyi</u>	37

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
3.1.3.11. <u>Agrega cilalanma deneyi</u>	38
3.1.3.12. <u>Su etkilerine karşı dayanıklılık (Soyulma) deneyi (Nicholson yöntemi)</u>	38
3.2. Bitüm.....	39
3.2.1. Bitümlerin sınıflandırılması	40
3.2.2. Bitümün reolojik özellikleri	46
3.2.3. Viskoelastik davranış	47
3.2.4. Bitümün yüksek, düşük ve orta sıcaklık davranışı.....	48
3.2.5. Bitüm deneyleri.....	50
3.2.5.1. <u>Penetrasyon deneyi</u>	50
3.2.5.2. <u>Yumuşama noktası deneyi</u>	51
3.2.5.3. <u>Fraas kırılma noktası deneyi</u>	52
3.2.5.4. <u>Düktilite deneyi</u>	52
3.2.5.5. <u>İnce film ısıtma kaybı (TFOT) deneyi</u>	53
3.2.5.6. <u>Özgül ağırlık deneyi</u>	53
3.2.5.7. <u>Çözünürlük deneyi</u>	53
3.2.5.8. <u>Parlama noktası deneyi</u>	54
3.2.5.9. <u>Viskozite deneyleri</u>	54
3.2.5.10. <u>Depolama stabilitesi deneyi</u>	55
3.3. Yaşlanma.....	56
3.3.1. Yaşlanmayı etkileyen faktörler	60
3.3.1.1. <u>Oksidasyon</u>	60
3.3.1.2. <u>Buharlaşma ve uçucu madde kaybı (Volatilizasyon)</u>	61
3.3.1.3. <u>Sterik veya fiziksel sertleşme</u>	61
3.3.1.4. <u>Yağların absorpsiyonu</u>	62
3.3.1.5. <u>Sızıntı sertleşmesi</u>	62
3.3.1.6. <u>Tiksotropi</u>	62
3.3.1.7. <u>Sinerisis</u>	63
3.3.1.8. <u>Polimerizasyon</u>	63
3.3.1.9. <u>Yüzey alanı</u>	63
3.3.1.10. <u>Sıcaklık</u>	64
3.4. Bitümlü Sıcak Karışımlarda Oluşan Bozulmalar	64
3.4.1. Tekerlek izi	65

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
3.4.1.1. <u>Yapısal tekerlek izi</u>	68
3.4.1.2. <u>Akma tekerlek izi</u>	69
3.4.1.3. <u>Aşınma tekerlek izi</u>	70
3.4.1.4. <u>Oturma (konsolidasyon) tekerlek izi</u>	71
3.4.2. Tekerlek izi oluşumunun nedenleri.....	71
3.4.2.1. <u>Dış faktörler</u>	71
3.4.2.2. <u>İç faktörler</u>	73
3.4.3. Çatlaklar.....	76
3.4.3.1. <u>Timsah sırtı (yorulma) çatlakları</u>	76
3.4.3.2. <u>Kenar çatlakları</u>	77
3.4.3.3. <u>Yansıma çatlakları (Beton derz yansıma çatlakları)</u>	77
3.4.3.4. <u>Blok çatlaklar</u>	77
3.4.3.5. <u>Termal çatlaklar</u>	78
3.4.3.6. <u>Kayma çatlakları (Slippage crack)</u>	79
3.4.3.7. <u>Boyuna ve enine çatlaklar</u>	79
3.4.4. Kasma	80
3.4.5. Sökülme	80
3.4.6. Cilalanmış agrega	81
3.4.7. Ondülasyon (Corrugation)	81
3.4.8. Çanak şekilli çukur (Pothole).....	82
3.4.9. Çökme	82
3.4.10. Şişme.....	82
3.5. Bitümlü Sıcak Karışımlara Uygulanan Deneyler.....	83
3.5.1. Statik ve dinamik sünme deneyi	83
3.5.2. İndirekt çekme dayanımı (ITS) deneyi	85
3.5.3. İndirekt çekme rijitlik modülü (ITSM) deneyi	88
4. MODİFİYE ASFALT	90
4.1. Katkı Kullanma Nedenleri ve Modifikasyon	90
4.2. Modifiye Edici ve Katkı Tipleri.....	94
4.3. Çeşitli Polimerlerin Avantaj ve Dezavantajları.....	96
4.4. Polimer Katkı Oranı Etkisi.....	98
4.5. Uyumluluk ve Stabilitate	100

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

5. NANO MALZEMELER.....	101
5.1. Nanomalzemelerin Mekaniksel ve Kimyasal Özellikleri.....	104
5.2. Nanomalzeme Üretim Yöntemleri	104
5.3. Mekanik Aşındırma Yöntemi.....	106
5.4. İnşaat Mühendisliğinde Nanoteknoloji ve Uygulamaları.....	108
6. BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIM TASARIM YÖNTEMLERİ.....	112
6.1. Marshall Tasarım Metodu	113
6.2. Superpave Tasarım Metodu	116
6.2.1. Superpave agrega şartnamesi	121
6.2.1.1. <u>Kaba agrega köşeliliği</u>	122
6.2.1.2. <u>İnce agrega köşeliliği</u>	122
6.2.1.3. <u>Yassı ve uzun taneli malzemeler</u>	123
6.2.1.4. <u>Kum eşdeğer</u>	124
6.2.1.5. <u>Agrega sertliği (Los Angeles aşınma)</u>	126
6.2.1.6. <u>Don dayanımı</u>	126
6.2.1.7. <u>Zararlı maddeler</u>	127
6.2.1.8. <u>Gradasyon (Dane dağılımı)</u>	127
6.2.2. Superpave bitüm şartnamesi	131
6.2.3. Performansa dayalı bitüm deneyleri	132
6.2.3.1. <u>Dönel viskozimetre (RV) deneyi</u>	133
6.2.3.2. <u>Dinamik kesme reometresi (DSR) deneyi</u>	135
6.2.3.3. <u>Kiriş eğme reometresi (BBR)</u>	141
6.2.3.4. <u>Doğrudan çekme deneyi (DTT)</u>	145
6.2.4. Bitüm yaşlandırma deneyleri	147
6.2.4.1. <u>Dönel ince film etüvü (RTFOT)</u>	147
6.2.4.2. <u>Basınçlı yaşlandırma kabı (PAV)</u>	148
6.2.5. Performans dereceli (PG) bitüm sınıfı seçimi	150
6.2.5.1. <u>Meteorolojik veri tabanı</u>	150
6.2.5.2. <u>Güvenirlilik</u>	150
6.2.5.3. <u>Hava sıcaklığı seçimi</u>	151
6.2.5.4. <u>Hava sıcaklıklarının kaplama sıcaklıklarına dönüştürülmesi</u>	152
6.2.5.5. <u>Kaplama sıcaklıklarına göre bitüm seçimi</u>	154

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

6.2.5.6. <u>Trafik hızına ve sayısına göre seçim</u>	154
6.2.6. Karışımların hacimsel özellikleri	156
6.2.6.1. <u>Sıkıştırılmış karışımdaki agregalar arası boşluk (VMA) hacmi</u>	158
6.2.6.2. <u>Sıkıştırılmış karışımdaki hava boşlukları (V) yüzdesi</u>	159
6.2.6.3. <u>Sıkıştırılmış karışımdaki bitümle dolu boşluk (VFA) oranı</u>	160
6.2.6.4. <u>Bitüm oranı (P_b)</u>	161
6.2.6.5. <u>Bitüm absorpsiyonu (P_{ba})</u>	161
6.2.6.6. <u>Efektif bitüm içeriği (P_{be})</u>	162
6.2.6.7. <u>Agrega hacim özgül ağırlığı (G_{sb})</u>	162
6.2.6.8. <u>Agrega efektif özgül ağırlığı (G_{se})</u>	162
6.2.6.9. <u>Gevşek karışımın maksimum özgül ağırlığı (G_{mm})</u>	163
6.2.6.10. <u>Sıkıştırılmış karışım hacim özgül ağırlığı (G_{mb})</u>	164
6.2.7. Superpave karışım tasarımı	164
6.2.7.1. <u>Superpave yoğurmalı sıkıştırıcısı (Gyratory Compactor)</u>	166
6.2.7.2. <u>Tasarım agrega gradasyonu seçimi</u>	169
6.2.7.3. <u>Karışımın hazırlanması ve sıkıştırılması</u>	171
6.2.7.4. <u>Verilerin değerlendirilmesi</u>	171
6.2.7.5. <u>Tasarım bitüm içeriği</u>	175
6.2.7.6. <u>Nem hassasiyeti</u>	175
6.2.7.7. <u>Durabilite</u>	177
7. MATERYAL VE YÖNTEM	179
7.1. Çalışmada Kullanılan Katkılar ve Özellikleri	179
7.1.1. Kolemanit ve özellikleri	179
7.1.2. Magnezyum spinel oksit ve özellikleri	181
7.2. Çalışma Kapsamında Nano Malzeme Üretimi	181
7.3. Görüntüleme Teknikleri	183
7.4. Katkı Maddelerinin Bitüm Üzerindeki Etkileri	188
7.5. Bitüm Seçilmesi	189
7.5.1. Proje hava şartlarının tespit edilmesi	189
7.5.2. Güvenirliğin seçilmesi	190
7.5.3. Hava sıcaklığının seçilmesi	191

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
7.5.4. Hava sıcaklıklarının kaplama sıcaklıklarına dönüştürülmesi.....	191
7.5.5. Kaplama sıcaklıklarına göre bitüm seçilmesi	193
7.5.6. Trafik hızı ve sayısına göre bitüm seçilmesi.....	193
7.6. Agrega Seçimi.....	196
7.7. Modifiye Bitüm Numunelerinin Hazırlanması	197
7.8. Çokdeğişkenli İstatistiksel Yöntemler	197
8. BULGULAR VE TARTIŞMA	200
8.1. Bitüm Deneyleri.....	200
8.1.1. Geleneksel bitüm deneyleri.....	200
8.1.2. Viskozite deneyleri	202
8.1.2.1. <u>Normal bitüm viskozite deney sonuçları</u>	202
8.1.2.2. <u>NMS modifiye bitüm viskozite deney sonuçları</u>	204
8.1.2.3. <u>NK modifiye bitüm viskozite deney sonuçları</u>	205
8.1.2.4. <u>Normal ve modifiye bitüm karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları</u>	207
8.1.3. Dönel ince film etüvü (RTFOT) ve kütle kaybı deneyi	209
8.1.3.1. <u>Dönel ince film etüvü (RTFOT) deneyi</u>	209
8.1.3.2. <u>Kütle kaybı deneyi</u>	210
8.1.4. Dinamik kesme reometresi (DSR) deneyi	210
8.1.4.1. <u>Yaşlandırılmamış bitüm DSR deney sonuçları</u>	211
8.1.4.2. <u>Yaşlandırılmış bitüm DSR deney sonuçları</u>	214
8.1.5. Kiriş eğme reometresi (BBR) deney sonuçları	215
8.1.6. Modifiye bitüm PG sınıfının belirlenmesi	216
8.1.7. Optimum katkı oranı	216
8.2. BSK Deneyleri	217
8.2.1. Marshall deneyleri	217
8.2.1.1. <u>Normal bitüm Marshall deneyleri</u>	218
8.2.1.2. <u>NMS modifiye bitüm Marshall deneyleri</u>	219
8.2.1.3. <u>NK modifiye bitüm Marshall deneyleri</u>	221
8.2.1.4. <u>Marshall deneyi toplu sonuçları</u>	222
8.2.2. Superpave deneyleri.....	225
8.2.2.1. <u>Normal bitüm Superpave BSK deneyleri</u>	225

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

8.2.2.2. <u>NMS modifiye bitüm Superpave BSK deneyleri</u>	234
8.2.2.3. <u>NK modifiye bitüm Superpave BSK deneyleri</u>	240
8.2.2.4. <u>Superpave deneyi toplu sonuçları</u>	245
8.2.3. <u>İndirekt çekme mukavemeti (ITS) deney sonuçları</u>	245
8.2.4. <u>Karışımların maliyet hesabı</u>	249
8.2.5. <u>Marshall numune sonuçları için çokdeğişkenli varyans analizi (MANOVA)</u>	251
8.2.5.1. <u>Normal bitüm BSK numuneleri için MANOVA analizi</u>	251
8.2.5.2. <u>NMS modifiye bitüm BSK numuneleri için MANOVA analizi</u>	253
8.2.5.3. <u>NK modifiye bitüm BSK numuneleri için MANOVA analizi</u>	254
8.2.5.4. <u>Çokdeğişkenli regresyon analizi</u>	256
8.2.6. <u>Dönel viskozimetre deney sonuçları için MANOVA analizi</u>	257
9. SONUÇ VE ÖNERİLER	262
KAYNAKLAR DİZİNİ	266
EK AÇIKLAMALAR	276
EK Açıklama-A: BSK ve Bütüm deneylerine ait fotoğraflar	277
ÖZGEÇMİŞ	286
EKLER	
Ek 1. Marshall Deney Sonuçları	
Ek 2. İstatistiksel Analiz Çizelgeleri	

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
1.1. Yol ağı durumu	4
1.2. Üstyapı satıh durumu (km).....	5
1.3. Türkiye’de ulaşım sektörlerine göre yurtiçi yolcu taşıma oranları, 2015	5
1.4. Türkiye’de ulaşım sektörlerine göre yurtiçi yük taşıma oranları, 2015	6
3.1. Farklı agrega gradasyon örnekleri.....	19
3.2. (a) Elek sallama cihazı (b) Deney elekleri	29
3.3. (a) Los Angeles deney aleti (b) Kullanılan çelik bilyalar	30
3.4. (a) İri agrega özgül ağırlık deney düzeneği (b) Doygun yüzey numune tartımı	33
3.5. (a) İnce agrega numunesi suda bekletilmesi (b) Piknometre ile tartım.....	34
3.6. Bitümün kimyasal yapısı.....	40
3.7. Aynı viskozite sınıfında üç farklı bitüm.....	44
3.8. Bitümün viskoelastik sünme davranışı	50
3.9. Bitümün karıştırma, depolama, taşıma, uygulama ve hizmet süresince yaşlanması	60
3.10. Tekrarlı yük altında kalıcı deformasyon davranışı.....	67
3.11. Yapısal tekerlek izi	69
3.12. Akma tekerlek izi	70
3.13. Aşınma tekerlek izi	70
3.14. (a) Sünme cihazı, komprasör ve bilgisayar (b) Yükleme çerçevesi.....	85
3.15. ITS deneyinde numune yerleşimi.....	86
5.1. Nanomalzemelerde artan yüzey alanı	103
5.2. Nanopartikül üretiminde kullanılan yaklaşımlar.....	105
6.1. Superpave karışım tasarım yönteminin yapısı	120
6.2. Kum eşdeğerlik deneyi.....	125
6.3. 19 mm maksimum boyut için maksimum yoğunluk gradasyonu	128
6.4. 19 mm maksimum boyut için Superpave gradasyon limitleri	130
6.5. Superpave tasarım agrega gradasyonu	131
6.6. Bitüm deneyleri ve BSK evreleri	133
6.7. Dönel viskozimetre (RV) deney şeması.....	134

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
6.8. Brookfield viskozite cihazı	135
6.9. Viskoelastik malzemelerde gerilme-deformasyon ilişkisi	136
6.10. Viskoelastik davranış	137
6.11. DSR deney şeması	138
6.12. DSR deneyinde bitüm numunesi yerleşimi (Papagiannakis ve Masad, 2008)	139
6.13. DSR deney cihazı.....	141
6.14. Kiriş eğme reometresi (BBR) deney şeması	142
6.15. BBR deney cihazı.....	143
6.16. BBR deney numunesi ebatları.....	144
6.17. m değer grafiği	144
6.18. Doğrudan çekme deneyi (DTT) şeması.	146
6.19. Düşük ve yüksek hava sıcaklığı normal dağılımı ve güvenilirlik kabulleri	151
6.20. En düşük ve en yüksek hava sıcaklıklarının dağılımı	152
6.21. En düşük ve en yüksek kaplama sıcaklıklarının dağılımı	154
6.22. Superpave bitüm seçimi	155
6.23. Sıkışmış BSK numunesinin bileşen diyagramı	157
6.24. (a) Superpave yoğurmalı sıkıştırıcısı (b) Kalıp modeli.....	166
6.25. Değişen bitüm içeriğinin hacimsel özellikler üzerindeki etkisi	176
7.1. 3 boyutlu Spex çalkalama cihazı.....	181
7.2. Tablalı öğütme cihazı.....	182
7.3. Malzeme öğütmede kullanılan çelik reaktör ve muhtelif boyutta çelik bilyalar.....	182
7.4. (a) Öğütme öncesi magnezyum (b) Öğütme öncesi kolemanit.....	183
7.5. EDS ve SEM analiz cihazı	184
7.6. XRD cihazı için numune hazırlanması	184
7.7. UNAM laboratuvarındaki Zeta Seizer cihazı.....	185
7.8. Mg spinel oksit zeta seizer analiz sonucu	185
7.9. Kolemanit zeta seizer analiz sonucu	186
7.10. Magnezyum spinel oksit için XRD kırınım desenleri.....	186
7.11. Kolemanit için XRD kırınım desenleri	187

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
7.12. Mg spinel oksit için SEM görüntüsü.....	188
7.13. Kolemanit için SEM görüntüsü.....	188
8.1. Katkı tip ve oranlarına göre penetrasyon deney sonuçları	201
8.2. Katkı tip ve oranlarına göre yumuşama noktası deney sonuçları	202
8.3. Normal bitüm sıcaklık – viskozite değişimi (150 dev/dak)	203
8.4. NMS modifiye bitüm için katkı oranlarına göre sıcaklık-viskozite değişimi	204
8.5. NK modifiye bitüm için katkı oranlarına göre sıcaklık-viskozite değişimi	205
8.6. Normal, NMS ve NK katkılı numunelerde 90-120°C sıcaklık aralığında viskozite değerleri	206
8.7. Normal, NMS ve NK katkılı numunelerde 130-160°C sıcaklık aralığında viskozite değerleri	206
8.8. Normal bitüm karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları.....	208
8.9. 5 NMS modifiye bitüm karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları.....	208
8.10. 5 NK modifiye bitüm karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları.....	209
8.11. Yaşlandırılmamış normal, NMS ve NK modifiye numunelerde 64 °C sıcaklık için $G^*/\sin \delta$ değerleri	213
8.12. Yaşlandırılmamış normal, NMS ve NK katkılı numunelerde DSR deneyi yenilme sıcaklıkları	214
8.13. Normal, NMS ve NK modifiye numunelerde 25°C sıcaklık için yorulma direnç parametresi ($G^*.\sin \delta$)	215
8.14. -18°C Sıcaklıkta $t=60$ s için katkı tip ve oranlarına göre sünme rijitliği (S) değişimi	215
8.15. Normal bitüm marshall numuneleri akma-bitüm oranı grafiği	219
8.16. NMS modifiye bitüm marshall numuneleri akma-bitüm oranı grafiği	221
8.17. NK modifiye bitüm marshall numuneleri akma-bitüm oranı grafiği	222
8.18. Normal, NMS ve NK katkılı BSK numuneleri stabilite-bitüm oranı değişimi.....	223
8.19. Normal, NMS ve NK katkılı BSK numuneleri akma-bitüm oranı değişimi.....	224
8.20. Normal, NMS ve NK katkılı BSK numuneleri MQ-bitüm oranı değişimi	224
8.21. Normal bitüm BSK numuneleri ortalama yoğunluk eğrileri.....	229

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)**Sekil****Sayfa**

8.22. Normal bitüm BSK numunelerinin hacimsel ve yoğunluk özelliklerinin bitüm oranı ile değişimi.....	233
8.23. NMS bitüm BSK numuneleri ortalama yoğunluk eğrileri	237
8.24. NMS bitüm BSK numunelerinin hacimsel ve yoğunluk özelliklerinin bitüm oranı ile değişimi.....	239
8.25. NK bitüm BSK numuneleri ortalama yoğunluk eğrileri	243
8.26. NK bitüm BSK numunelerinin hacimsel ve yoğunluk özelliklerinin bitüm oranı ile değişimi	244
8.27. BSK numune tiplerine göre $ITS_{yaş}-ITS_{kuru}$ değişimi	249

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Cizelge</u>	<u>Sayfa</u>
1.1. Yük ve yolcu taşımacılığı artış oranları	4
1.2. Satış cinsine göre yol ağı	4
3.1. Agregada dane boyutlarına göre numune ağırlıkları	28
3.2. Alternatif dar aralık sınıfları.....	31
3.3. Kaba agreganın fiziksel ve mekanik özellikleri	32
3.4. Asfalt betonunda kullanılan agregalar için sınır şartları	36
3.5. Yumuşak bitümlerin viskozite sınıflandırması özellikleri	43
3.6. AASHTO M 226 ve ASTM D3381'e göre bitüm viskozite sınıflandırması	45
4.1. Bitüm modifikasyon çeşitleri	95
4.2. Bitüm modifiyesinde yaygın olarak kullanılan polimerlerin avantaj ve dezavantajları	97
5.1. Ölçekler ve konu alanları	103
5.2. Yapılarda kullanılan nano malzemelerden örnekler	109
6.1. Kaplama performansına etki eden faktörler	112
6.2. Asfalt betonu tasarım kriterleri	115
6.3. Aşınma tabakası için gradasyon limitleri	116
6.4. AASHTO MP1 gereklilikleri özeti	118
6.5. Superpave karışım gradasyonları	121
6.6. Kaba agregada köşelilik kriterleri	122
6.7. İnce agregada köşelilik kriterleri	123
6.8. Kil içeriği kriterleri	125
6.9. Elek boyutları ve 0.45 üsleri	127
6.10. Superpave karışımlarda agregada gradasyon kontrol noktaları	129
6.11. Superpave karışımlar için yasaklı bölge sınırları	130
6.12. SHRP plak geometrisi şartnamesi	139
6.13. Hedef kayma gerilmesi ve şekil değişimi değerleri	140
6.14. Bitüm sınıfına göre PAV deney sıcaklıkları	149
6.15. Kaplama tasarım sıcaklıkları ve bitüm sınıfı	150
6.16. Trafik hızı ve sayısı esas alınarak bitüm seçilmesi	156

ÇİZELGELER DİZİNİ (devam)

<u>Cizelge</u>	<u>Sayfa</u>
6.17. Superpave VMA sınır şartları	159
6.18. Superpave VFA sınır değerleri.....	161
6.19. Superpave yoğurmalı sıkıştırma enerjisi.....	168
6.20. Superpave sıkıştırma kriterleri	169
7.1. Kolemanit kimyasal özellikleri	180
7.2. Antalya için son 20 yıllık en yüksek ve en düşük sıcaklık değerleri	190
7.3. Sıcaklık ortalamaları ve standart sapmaları	190
7.4. SHRP ve Kanada SHRP yöntemine göre hesaplanan kaplama tasarım sıcaklıkları	192
7.5. YOGT değerleri	193
7.6. Yıllara göre motorlu kara taşıtları sayısı	194
7.7. 20 yıllık analiz süresi için yoldan geçecek trafik sayısı	195
7.8. Taşıt eşdeğerlik faktörleri	195
7.9. Agreg a elek analizi deney sonuçları	196
8.1. Normal bitüm fiziksel özellikleri	200
8.2. Normal, NMS ve NK modifiye bitüm numuneleri penetrasyon ve yumuşama noktası deney sonuçları	201
8.3. Farklı dönüş hızları için normal bitüm viskozite değerleri	203
8.4. NMS modifiye bitüm için katkı oranlarına göre sıcaklık-viskozite değişimi	204
8.5. NK modifiye bitüm için katkı oranlarına göre sıcaklık-viskozite değişimi	205
8.6. 135 ve 165°C viskozite deney sonuçları	207
8.7. Normal, NMS ve NK modifiye numuneleri sıkıştırma ve karıştırma sıcaklıkları	209
8.8. Normal, NMS ve NK modifiye bitüm numuneleri için kütle kaybı deney sonuçları	210
8.9. Yaşlandırılmamış normal ve NMS modifiye numuneler için G^* ve δ değerleri	212
8.10. Yaşlandırılmamış normal ve NK modifiye numuneler için G^* ve δ değerleri	212
8.11. Katkı tipleri ve oranlarına göre 64°C sıcaklıkta $G^*/\sin \delta$ değerleri ile yenilme sıcaklıkları	213

ÇİZELGELER DİZİNİ (devam)

Cizelge

Sayfa

8.12. Normal, NMS ve NK modifiye bitümler yüksek ve düşük sıcaklık PG sınıfları.....	216
8.13. Normal bitüm Marshall tasarım özet tablosu	218
8.14. Normal bitüm OBO marshall deney sonuçları.....	219
8.15. NMS modifiye bitüm Marshall tasarım özet tablosu	220
8.16. NMS modifiye bitüm OBO marshall deney sonuçları	220
8.17. NK modifiye bitüm Marshall tasarım özet tablosu	221
8.18. NK modifiye bitüm OBO marshall deney sonuçları.....	222
8.19. Marshall deneyi toplu sonuçları	223
8.20. Bitüm tip ve oranlarına göre yoğurmalı sıkıştırıcı ile dökülen numuneler	225
8.21. Normal bitüm BSK numuneleri fiziksel özellikleri	225
8.22. Normal bitüm BSK %4.0 bitüm oranı sıkıştırma karakteristikleri	226
8.23. Normal bitüm BSK %4,5 bitüm oranı sıkıştırma karakteristikleri	227
8.24. Normal bitüm BSK %5,0 bitüm oranı sıkıştırma karakteristikleri	228
8.25. Normal bitüm BSK %5.5 bitüm oranı sıkıştırma karakteristikleri	228
8.26. Normal bitüm BSK numuneleri stabilite-akma değerleri	229
8.27. Normal bitüm ile hazırlanan BSK numunelerinin hacim özellikleri ve yoğunluk değerleri	230
8.28. Kaba, ince ve filler agrega özgül ağırlık değerleri	230
8.29. Karışımın %4,28 tasarım bitüm içeriğindeki özellikleri	234
8.30. NMS modifiye bitüm BSK numuneleri fiziksel özellikleri	234
8.31. NMS modifiye bitüm BSK %3,97 bitüm oranı sıkıştırma karakteristikleri	235
8.32. NMS modifiye bitüm BSK %4,47 bitüm oranı sıkıştırma karakteristikleri	235
8.33. NMS modifiye bitüm BSK %4,97 bitüm oranı sıkıştırma karakteristikleri	236
8.34. NMS modifiye bitüm BSK %5,47 bitüm oranı sıkıştırma karakteristikleri	236
8.35. NMS modifiye bitüm BSK numuneleri stabilite-akma değerleri	237
8.36. NMS modifiye bitüm ile hazırlanan BSK numunelerinin hacim özellikleri ve yoğunluk değerleri	238
8.37. Karışımın %4,21 tasarım bitüm içeriğindeki özellikleri	239
8.38. NK modifiye bitüm BSK numuneleri fiziksel özellikleri	240

ÇİZELGELER DİZİNİ (devam)

Cizelge

Sayfa

8.39. NK modifiye bitüm BSK %4,10 bitüm oranı sıkıştırma karakteristikleri	240
8.40. NK modifiye bitüm BSK %4,60 bitüm oranı sıkıştırma karakteristikleri	241
8.41. NK modifiye bitüm BSK %5,10 bitüm oranı sıkıştırma karakteristikleri	241
8.42. NK modifiye bitüm BSK %5,60 bitüm oranı sıkıştırma karakteristikleri	242
8.43. NK modifiye bitüm BSK numuneleri stabilite-akma değerleri	242
8.44. NK modifiye bitüm ile hazırlanan BSK numunelerinin hacim özellikleri ve yoğunluk değerleri	243
8.45. Karışımın %4,33 tasarım bitüm içeriğindeki özellikleri	245
8.46. Şartlandırılmamış (kuru) numunelerin fiziksel özellikleri	246
8.47. Şartlandırılmış (yaş) numunelerin fiziksel özellikleri	247
8.48. Şartlandırılan BSK numunelerinin doygunluk dereceleri	247
8.49. İndirekt çekme mukavemeti oranları (ITSR)	248
8.50. Normal bitüm BSK numuneleri Box-M Testi sonuçları	251
8.51. Normal bitüm BSK numuneleri varyansların eşitliği için Levene's testi sonuçları	251
8.52. Normal bitüm BSK numuneleri çokdeğişkenli test sonuçları	252
8.53. Normal bitüm BSK numuneleri için etkilerin sınanması	252
8.54. NMS modifiye BSK numuneleri Box-M Testi sonuçları	253
8.55. NMS modifiye BSK numuneleri varyansların eşitliği için Levene's testi sonuçları	253
8.56. NMS modifiye BSK numuneleri çokdeğişkenli test sonuçları	253
8.57. NMS modifiye BSK numuneleri için etkilerin sınanması	254
8.58. NK modifiye BSK numuneleri Box-M Testi sonuçları	255
8.59. NK modifiye BSK numuneleri varyansların eşitliği için Levene's testi sonuçları	255
8.60. NK modifiye BSK numuneleri çokdeğişkenli test sonuçları	255
8.61. NK modifiye BSK numuneleri için etkilerin sınanması	256
8.62. Regresyon model özeti	257
8.63. Viskozite deney sonuçları ANOVA tablosu	258

ÇİZELGELER DİZİNİ (devam)

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
8.64. Sabit terim eklenmiş model sonuçları	258
8.65. Betimleyici istatistikler	258
8.66. Bağımsız örneklem t testi sonuçları	259
8.67. Sıcaklık karşılaştırmalı analiz sonuç tablosu (90-120°C için)	259
8.68. Sıcaklık karşılaştırmalı analiz sonuç tablosu (130-160°C için)	260
8.69. Katkı oranı karşılaştırmalı analiz sonuçları.....	261

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

Açıklama

G^*	Kompleks Kayma Modülü
nm	Nanometre
m	Sünme Oranı
S	Sünme Rijitliği
δ	Faz Açısı
G_{mb}	Sıkıştırılmış Karışım Hacim Özgöl Ağırlığı,
G_{mm}	Asfalt Karışımın Maksimum Özgöl Ağırlığı

Kisaltmalar

Açıklama

AASHTO	Amerikan Devlet Otoyolları ve Resmi Taşımacılık Birliği
ASTM	Amerikan Test ve Malzemeler Derneği
BBR	Kiriş Eğme Reometresi
BDBO	Bitümle Dolu Boşluk Oranı
BSK	Bitümlü Sıcak Karışım
CBR	California Taşıma Oranı
CNF	Karbon Nano Fiber
CNT	Karbon Nanotüp
DSR	Dinamik Kesme Reometresi
DTT	Doğrudan Çekme Deneyi
EDS	Enerji Dağılımı Spektrometresi
PAV	Basınçlı Yaşlandırma Kabı
PG	Performans Sınıfı
PMA	Polimer Modifiye Asfalt
ITS	İndirekt Çekme Dayanımı
ITF	İndirekt Çekme Yorulması
MA	Mekanik Aşındırma
MS	Marshall Stabilite

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)**Kısaltmalar****Açıklama**

NK	Nano Kolemanit
NMS	Nano Magnezyum Spinel Oksit
OBO	Optimum Bitüm Oranı
OMMT	Organik Montmorillonit
PAV	Basınçlı Yaşlandırma Kabı
PMB	Polimer Modifiye Bitüm
RTFOT	Dönel İnce Film Etüvü Deneyi
RV	Dönel Viskozimetre
SBS	Stiren Bütadien Stiren
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
SHRP	Stratejik Karayolları Araştırma Programı
SUPERPAVE	Yüksek Performanslı Asfalt Kaplama
VFA	Bitümle Dolu Boşluk
VMA	Agregalar Arası Boşluk Oranı
XRD	X Işını Kırınım Cihazı

1. GİRİŞ VE AMAÇ

Ülkemizde karayolları, imalat ve bakım-onarımının kolay yapılabilmesi, sonrasında yolun kısa sürede trafiğe açılabilmesi gibi nedenlerle esnek kaplama olarak inşa edilmektedir.

Üstyapı tabakalarının en uygun şekilde tasarımı; güvenlik, konfor ve ekonomi açısından büyük önem arz etmektedir. Üstyapının ömrü, yapısal tasarım şartlarına, malzeme karakteristiklerine, tabaka kalınlıklarına, bakım faaliyetlerine veya kabul edilen bozulma kriterlerine göre değişiklik göstermekle beraber, ortalama 10-15 yıl olarak kabul edilebilir (Tam, 2006).

Uygulanan her trafik yükü kaplamalardaki bozulmaların oluşumuna belirli ölçüde katkıda bulunur. Yıllar boyunca kaplamalarda tekerlek izi oluşumu, yorulma çatlağı, kuma vb. farklı çeşitte bozulmalar görülebilir. Bu bozulmalardan biri veya birkaçı belirli sınırları aştığında kaplama hizmet ömrünü tamamlamış olarak kabul edilir (Tam, 2006).

Esnek üstyapı kaplamalarında, artan trafik yükü ve iklim koşullarına bağlı olarak meydana gelen tekerlek izi, soyulma, çatlama, ondülasyon gibi bozulmaları geciktirerek, bakım ve yenileme gereksinimini daha seyrek aralıklara düşürmek ve kaplama performansını artırmak amacıyla birçok ülkede bitüme veya karışımlara çeşitli katkı maddeleri eklenerek modifiye bitümler veya karışımlar elde edilmektedir. Bitümün modifiye edilmesindeki temel amaç, kaplamaların yüksek sıcaklıkta yeterli rijitliğe, düşük sıcaklıklarda ise yeterli esnekliğe sahip olmasını sağlamaktır.

Son 30 yılda, bitüm modifiyesinde büyük ölçüde polimerler kullanılmıştır. Özellikle stiren butadiene stiren (SBS) gibi bazı polimerler; bitümün mekanik dayanım, sıcaklık duyarlılığı, elastisite ve adezyon gibi özelliklerini geliştirdiğinden tercih edilmektedir. Ancak, polimer ile bitüm modifiyesinde, polimer-bitüm uyumluluğu, düşük depolama stabilitesi, ultraviyole radyasyon (bitümü sertleştirir) ve oksidasyon yaşlanması gibi sorunlar hala çözülememiştir. Bu sorunların aşılabilmesi için, bitüm modifiyesinde kullanılmak üzere yeni modifiye edicilerin araştırılması konusu önem kazanmaktadır. Bu

bağlamda, bitüm modifiyesinde nano malzemelerin kullanımı üzerine yapılan çalışmalar artarak devam etmektedir.

Nanomalzemelerin karakterizasyonu ve uygulanmasına yönelik çalışmaların artması ile nano bilim ve nanoteknoloji son on yılda çok hızlı büyümüştür. Nano malzemelerin en önemli özelliği yüzey alanı / hacim oranının çok büyük olmasıdır. Nanometre ölçeğine doğru inildikçe malzeme özellikleri çarpıcı şekilde değiştiğinden parçacık boyutu da oldukça önem kazanmaktadır. Parçacık boyutu nano ölçeğe indiğinde, malzemenin yeni fiziksel ve kimyasal özellikler kazanması söz konusu olmakta, mekanik özelliklerinde; rijitlik ve elastisite kabiliyetlerinde iyileşme görülmektedir.

Ülkemizin petrol ihtiyacını karşılamada büyük oranda dışa bağımlı olması ve Türkiye'deki yolların neredeyse tamamının esnek kaplama olması göz önüne alındığında; özellikle hizmet ömrünü tamamlamadan esnek üstyapıların bozulması neticesinde yolların yapım veya onarım maliyetleri ülke ekonomisine ciddi yük getirmektedir. Bu bağlamda, daha üstün performans gösterecek asfalt beton kaplamaların inşası için yenilikçi teknolojiler üzerinde yoğunlaşılması, bitüm modifiyesinde kullanılan geleneksel katkıların dışında, malzeme özelliklerini geliştirmede daha etkili olacak katkıların geliştirilmesi önem taşımaktadır. Çalışmanın asfalt beton tasarımında yeni malzemeler kullanılması konusunda katkı sağlayabileceği değerlendirilmektedir.

Karayollarında, öngörülen hizmet ömründen önce meydana gelen bozulmalar, farklı hava ve iklim şartları altında kaplamanın gerçek performansını koruyamaması, laboratuvar şartlarının arazi şartlarını tam olarak yansıtamaması, analiz ve uygulama sırasındaki sıkıştırma tekniklerinin farklı olması, gelişmiş birçok ülkeyi yeni tasarım yöntemleri geliştirmeye sevk etmiştir. Bu tasarım yöntemlerinden en önemlisi “Superior Performing Asphalt Pavements” (SUPERPAVE) olarak isimlendirilen “Yüksek Performanslı Asfalt Kaplama” yöntemidir.

Geleneksel bitüm şartnameleri penetrasyon, viskozite ve düktilite gibi standart deney sıcaklıklarında yapılan ve çoğu ampirik olan fiziksel özellik deneyleri çerçevesinde geliştirilmiştir. Superpave bitüm şartnamesinin en önemli özelliği, deneylerin standart deney sıcaklıklarında değil, kaplamanın hizmet vereceği bölgedeki sıcaklıklarda yapılarak

asfalt betonunun saha performansı ile doğrudan ilgili fiziksel ve reolojik özelliklerinin analitik deneylerle tespit edilmesidir.

Bitümlü sıcak karışımlarda (BSK), asfalt betonunun üretim, serim ve sıkıştırılması esnasında oluşan kısa dönem yaşlanma ile hizmet ömrü boyunca oluşan ve uzun dönem yaşlanma olarak adlandırılan yaşlanmalar meydana gelmektedir. Superpave şartnamesinde olmasına rağmen, geleneksel şartnamelerde asfalt betonun hizmet ömrü boyunca oluşacak yaşlanmayı temsil edecek bir deney bulunmamaktadır (Geçkil, 2008).

Yolun toplam yapım maliyeti içerisinde, karayolu üstyapı maliyeti büyük bir paya sahiptir. Düz bir arazide 1 kilometre uzunluğunda, 7 metre genişliğinde (iki şerit) ve yukarıdan aşağıya doğru 7 cm asfalt betonu aşınma tabakası, 8 cm asfalt betonu binder tabakası, 20 cm plent-miks temel tabakası ile 30 cm kalınlığında alttemel tabakası kullanılarak inşa edilecek asfalt beton yolun yüklenici kârı dahil olmak üzere 2018 yılı KGM birim fiyatları ile yaklaşık maliyeti 825 000 TL'dir (1\$ = 4,60 TL alınırsa, yaklaşık 180 000 \$).

BSK'larda bağlayıcı olarak kullanılan bitüm, ham petrolün damıtılmasıyla elde edilmektedir. Ülkemizde üretilen ham petrolün yetersiz kalması nedeniyle, her yıl sadece TUPRAŞ kanalıyla 20 milyon tonun üzerinde ham petrol ithal edilmektedir. Bu büyüklükte petrol ithalatının bir diğer anlamı da, yıllık milyon tonlara varan miktarlarda bitüm ithalatının yapıldığı gerçeğidir. 2016 yılı için TUPRAŞ rafinerisindeki bitüm üretim miktarı 3,44 milyon ton'dur (TUPRAŞ, 2017).

Ülkemizde hızlı kentleşme sürecinde taşıt sahipliliğinin hızlı bir artış sürecine girmesi ve dolayısıyla hareketliliğin çoğalması, karayollarındaki taşıt kullanımını da artırmıştır. 2003-2013 yılları arasında Taşıt x km değeri toplam %90, Ton x km değeri %47, Yolcu x km değeri ise %63 oranında artış göstermiştir. 2013-2016 yılları arasında yük ve yolcu taşımacılığında bir önceki yıla göre artış oranları Çizelge 1.1' de verilmiştir.

Çizelge 1.1. Yük ve yolcu taşımacılığı artış oranları (KGM, 2017)

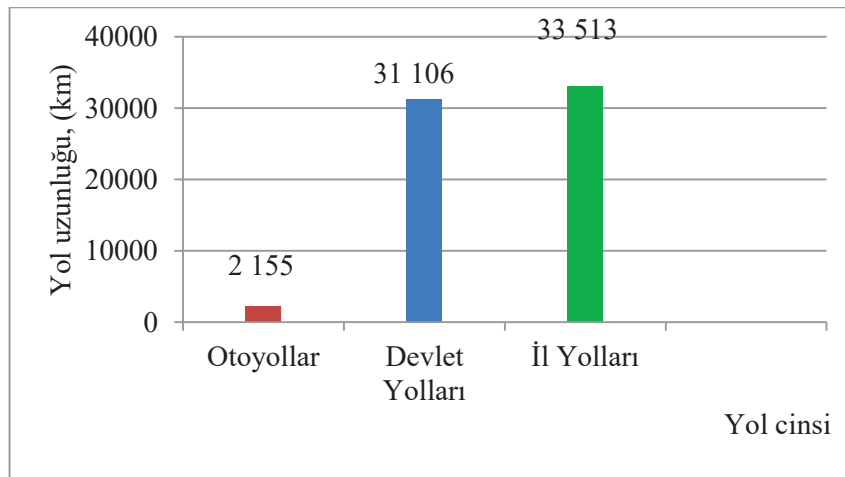
Değerler (Milyon)	2013 Yılı	2014 Yılı	2015 Yılı	2016 Yılı	Artış Oranları (%) 2013-2014/2014-2015/2015- 2016
Taşıt-km	99 432	102 988	113 274	119 671	3,58 / 9,99 / 5,65
Yolcu-km	268 179	276 073	290 734	300 852	2,94 / 5,31 / 3,48
Ton-km	224 048	234 492	244 329	253 139	4,66 / 4,20 / 3,60

Karayolları Genel Müdürlüğü'nün sorumluluğu altındaki yol ağı 1 Ocak 2017 tarihi itibari ile toplam 66 774 km'ye ulaşmış olup, yol ve satıh cinsine göre Çizelge 1.2' de verilmiştir.

Çizelge 1.2. Satıh cinsine göre yol ağı (KGM, 2017)

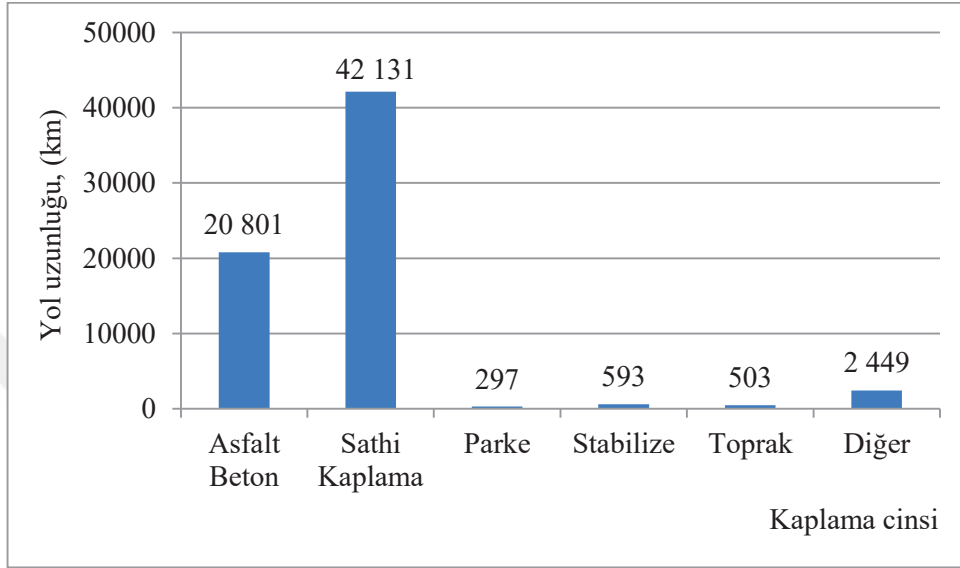
Satıh Cinsine göre Yol Ağı (km)							
	Asfalt Betonu	Sathi Kaplama	Parke	Stabilize	Toprak	Diğer Yollar	Toplam
Otoyol	2 155	---	---	---	---	---	2 155
Devlet Yolları	15 576	15 077	67	40	---	346	31 106
İl Yolları	3 070	27 054	230	553	503	2 103	33 513
Toplam	20 801	42 131	297	593	503	2 449	66 774

Yol ağının 23 444 km'si diğer bir ifadeyle %35'i bölünmüş yol olarak hizmet vermektedir. Üstyapı kaplaması olarak incelendiğinde bu yol ağının 42 131 km'sinin sathi kaplama, 20 801 km'sinin BSK kaplama olduğu görülmüştür. Ülkemizdeki yol ağı durumu Şekil 1.1, üstyapı satıh durumu ise Şekil 1.2'de verilmiştir.



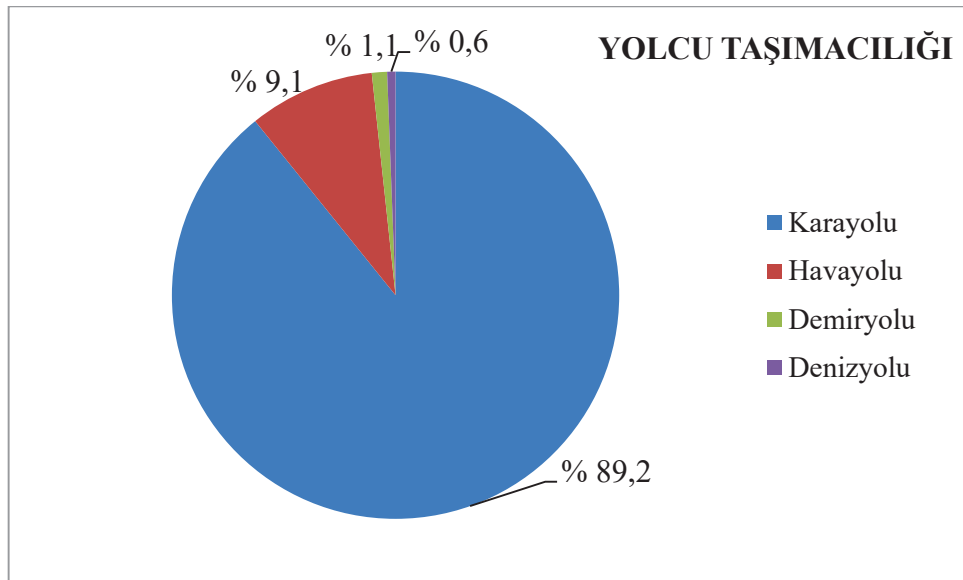
Şekil 1.1. Yol ağı durumu (KGM, 2017)

Ülkemizde yolcu ve yük taşımacılığında en fazla tercih edilen ulaşım türü karayolu olup, 2015 yılı itibarıyla yurtiçi yolcu taşımacılığının %89,2'si ve yük taşımacılığının %89,8'i karayolu ile yapılmaktadır (UBAK, 2017).

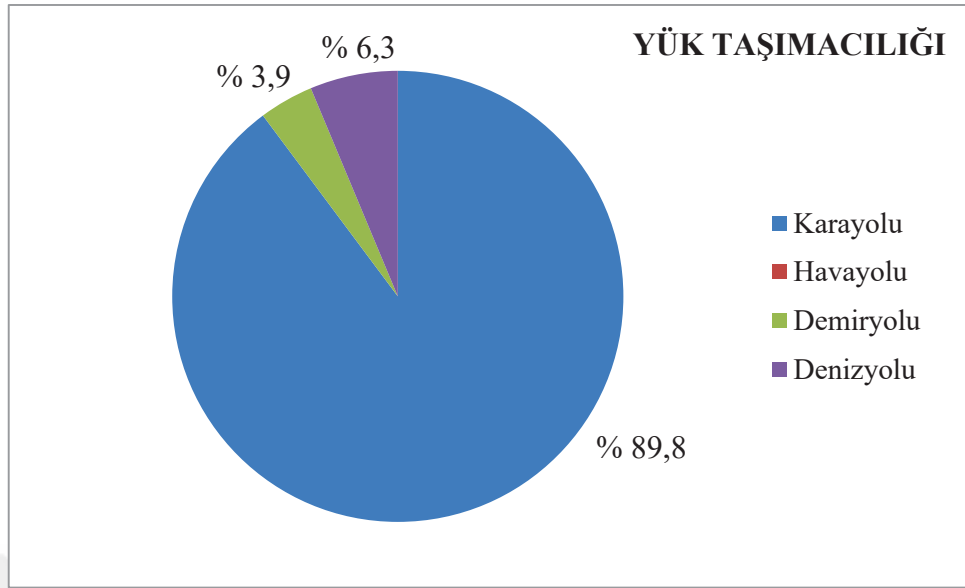


Şekil 1.2. Üstyapı satıh durumu (km) (KGM, 2017)

Türkiye’de ulaşım sektörlerine göre yurtiçi yolcu taşıma oranları Şekil 1.3, yurtiçi yük taşıma oranları ise Şekil 1.4’de verilmiştir.



Şekil 1.3. Türkiye’de ulaşım sektörlerine göre yurtiçi yolcu taşıma oranları, 2015 (UBAK, 2017)



Şekil 1.4. Türkiye’de ulaşım sektörlerine göre yurtiçi yük taşıma oranları, 2015 (UBAK, 2017)

Bu çalışmada bitüm modifiyesinde ilk defa katkı malzemesi olarak kullanılan magnezyum spinel oksit ve kolemanit, mekanik aşındırma yöntemi ile nano boyuta indirgenmiş, sonrasında belirli oranlarda nano malzeme içeren modifiye bitüm numuneleri hazırlanmıştır. Nano malzemeler ile yapılan modifiye işleminin bitüm ve BSK performans özellikleri üzerindeki etkilerinin araştırılması amaçlanmıştır.

Özellikle dünya kolemanit üretiminin %95’inin Türkiye’de yapıldığı değerlendirildiğinde (Helvacı, 2004), nano kolemanit ile bitüm modifiyesi neticesinde tatmin edici sonuçlar elde edilmesi halinde, bor minerali olan kolemanit için yeni kullanım alanları bulunabilecek ve ülke ekonomisine katkı sağlayabilecek yeni bir alan oluşturulacaktır. Bitüm modifiye edici olarak kolemanit minerali için tatmin edici sonuçlar elde edildiği takdirde, benzer şekilde dünyadaki rezervlerin büyük bir bölümünün ülkemizde olduğu, diğer bir bor minerali olan Üleksit için de çalışmalar yapılabileceği değerlendirilmektedir.

Günümüzde bitüm ve BSK modifiye etmek amacıyla yaygın olarak kullanılan polimerlerin en büyük dezavantajlarının düşük depolama stabiliteleri ve yüksek maliyetleri olduğu değerlendirildiğinde, nanomalzeme üretim maliyetlerinin düşmesi ve büyük ölçekli olarak kullanılmaları halinde, durabilitesi ve yaşlanma direnci yüksek BSK’ların inşa edilmesi mümkün olacaktır.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Bitüm ve bitümlü sıcak karışımların fiziksel özelliklerinin iyileştirilerek performansının artırılmasına yönelik çalışmalara 1940'lı yıllardan itibaren başlanmıştır.

Fischer (1941) tarafından bitüm ve agrega arasındaki adezyonun iyileştirilebilmesi amacıyla alifatik amin ve bir çeşit organik asit olan oleik asit kullanılmıştır. Boediger (1943) de benzer şekilde BSK'daki adezyonun iyileştirilebilmesi için naftenik asit tuzu ve sülfonik asitten yararlanmıştır.

Düşük sıcaklıklarda çatlak oluşumuna karşı direnci fazla ve düktil BSK'ların üretilmesi için Klinger (1943) tarafından polimetakrilat, Traxler ve Wilkinson (1954) tarafından ise sentetik kauçuk katkı malzemesi olarak kullanılmıştır.

Dünya çapında yol ağının genişlemesi, iklim şartları ve artan trafik yüklerine dayanıklı asfalt beton kaplamalar inşa edilmesi zarureti neticesinde, BSK'larda katkı kullanımı giderek yaygınlaşmış, bu maksatla en çok Stiren Bütadien Stiren (SBS), düşük yoğunluklu Polietilen (LDPE) ve Etilen Vinil Asetat (EVA) gibi polimerler kullanılmaya başlanmıştır. Bu katkıların yanısıra polifosforik asit, kauçuk, sülfür ve reçine gibi katkıları da kullanılmaktadır.

Isacsson ve Lu (1999) tarafından yapılan çalışmada; Stiren Etilen Bütilen Stiren (SEBS), Etilen Vinil Asetat (EVA) ve Etilen Bütıl Akrilat (EBA) kopolimerleri bitümü modifiye etmek amacıyla kullanılmıştır. %3, 6 ve 9 katkı oranlarında numuneler hazırlanmıştır. Yumuşama noktası 39,5°C olan normal bitüm modifiye edildikten sonra yumuşama noktalarında belirgin yükselmeler gözlenmektedir. Yumuşama noktaları; %9 SEBS katkılı modifiye bitüm için 78,5°C; %9 EVA katkılı bitüm için 64,4; %9 EBA katkılı bitüm için ise 77,8°C'dir. 165 dmm olan normal bitüm penetrasyon değeri, %9 SEBS katkılı numunelerde 46 dmm, %9 EVA katkılı numunelerde 77 dmm ve %9 EBA katkılı numunelerde 61 dmm'ye düşmektedir. Dönel viskozimetre deney sonuçlarına göre; 135°C'de normal bitüm için 224 mm²/s olan viskozite değeri, %9 SEBS katkılı numunelerde 3950, %9 EVA katkılı numunelerde 1070, %9 EBA katkılı numunelerde ise

3040 mm²/s'ye yükselmektedir. Kiriş eğme reometresi (BBR) deney sonuçlarına göre, özellikle -15°C'nin altındaki sıcaklıklarda modifiye bitüm numunelerinin sünme rijitlikleri normal bitüme kıyasla azalmaktadır. Bütün polimer katkıları için geçerli olmak üzere, katkı oranı arttıkça depolama stabilitesi azalmaktadır. EBA ile modifiye edilen bitüm numuneleri en düşük depolama stabilitesine sahiptir.

Kumar vd. (2009) tarafından atık kamyon lastiklerinin öğütülerek bitümün modifiye edilmesi suretiyle yapılan çalışmada, 60/70 ve 80/100 penetrasyonlu bitümleri modifiye etmek amacıyla %3, 5, 7 ve 9 katkı oranlarında öğütülmüş lastik kullanılmıştır. 60/70 penetrasyon normal bitümün yaşlanma öncesi 63 dmm olan penetrasyon değeri %9 katkı oranında 51 dmm'ye düşmektedir. 80/100 penetrasyon normal bitümün 94 dmm olan penetrasyonu ise %9 katkı oranında 54 dmm'ye düşmektedir. Yaşlandırılmış bitüm DSR deney sonuçlarına göre; 58°C sıcaklık için 60/70 penetrasyon normal bitüm için 3,79 kPa olan $G^*/\sin \delta$ tekerlek izi dayanım parametresi %9 katkı oranında 9,97 kPa'ya yükselmektedir. Modifiye bitüm numunelerinin G^* kayma modülü değerleri normal bitüme göre daha yüksektir. Faz açısı (δ) değeri ise modifiye bitüm numuneleri için normal bitüme kıyasla daha düşüktür, bu durum modifiye işlemi neticesinde bitümün elastik davranışının geliştiğini göstermektedir.

Kök vd. (2013) tarafından yapılan çalışmada ise, öğütülmüş lastik ve SBS polimeri ile modifiye işlemi neticesinde bitüm ve BSK numunelerinin performanslarının karşılaştırılması amaçlanmıştır. Bu maksatla 160/220 penetrasyon bitüm kullanmak suretiyle bitüm ağırlığınca %2-6 katkı oranlarında %1'lik artışlar halinde beş farklı katkı oranında SBS ile modifiye edilen bitüm numuneleri hazırlanmıştır. Benzer şekilde öğütülmüş lastik için de %2-10 katkı oranlarında %2'lik artışlar halinde 5 farklı katkı oranında modifiye bitüm numuneleri hazırlanmıştır. DSR deney sonuçlarına göre, SBS ile modifiye neticesinde elde edilen tekerlek izi direnç parametrelerine ulaşmak için oldukça yüksek katkı oranında öğütülmüş lastik kullanmak gerekmektedir. Deney sonuçları, bitüm %2 ve 3 katkı oranında SBS ile modifiye edildiğinde %4 veya 6 katkı oranında öğütülmüş lastik kullanıldığı takdirde aynı bitüm sınıfının (PG 64-34) elde edilebildiğini göstermektedir. Benzer şekilde %4 SBS modifiye bitüm numuneleri ile %8 ve 10 katkı oranında öğütülmüş lastik içeren numunelerin aynı bitüm sınıfında (PG 70-34) olduğu görülmektedir. %10 katkı oranında öğütülmüş lastik ile modifiye edilen bitüm ile

hazırlanan BSK numuneleri, uygulanan yük kaldırıldığında en yüksek geri dönüşümlü şekil değişimini göstermektedir. İndirekt çekme yorulma deneylerine göre; %5 SBS ve %10 öğütülmüş lastik ile modifiye edilen bitüm ile hazırlanan BSK numunelerinin en iyi yorulma performansını gösterdiği tespit edilmiştir.

Ancak bazı polimer modifiye bitümlerin yüksek sıcaklık hassasiyeti, düşük yaşlanma direnci ve düşük depolama stabilitesi araştırmacıları yeni katkı malzemeleri bulmaya zorlamaktadır.

Bu bağlamda nano malzemelerin kullanılması konusunda yapılan çalışmalar önem kazanmakta ve artarak devam etmektedir. Dünya çapında yüksek performanslı asfalt betonun üretilmesi için yapılan çalışmalara bakıldığında; bitüm modifiyesinde nano silika, nanokil, nano Fe_2O_3 , Al_2O_3 ve ZnO , nano TiO_2 ve karbon nano tüpler gibi malzemelerin kullanıldığı görülmektedir.

You vd. (2010) tarafından bitümün %2 ve %4 oranlarında iki farklı tip nanokil (A ve B) kullanılmak suretiyle modifiye edilmesi ile yapılan çalışmada; viskozite değerlerinde normal bitüme kıyasla %41-112 arasında artış, kompleks kayma modülü (G^*) değerlerinde ise %125-196 oranında artış sağlanmıştır.

Amirkhanian vd. (2011) tarafından aynı bitüm sınıfındaki üç farklı kaynaktan temin edilen malzemenin bitüm ağırlığınca %0,2; 0,5; 1,0 ve 1,5 katkı oranlarında nano karbon parçacıklar ile modifiyesi ile yaşlandırılmamış numuneler üzerinde yapılan çalışmada; Dinamik kesme reometresi (DSR) deney sonuçlarına göre yenilme sıcaklıklarında 5-9°C arasında artış sağlanmıştır.

Santagata vd. (2012) tarafından bitüm modifiye edici olarak karbon nano tüpler (CNT) kullanılarak bitüm ağırlığınca %0,1; 0,5 ve 1 oranlarında CNT ilave edilerek yapılan çalışmada; CNT'ler en az %0,5 oranında kullanıldığında bitümün reolojik özelliklerini önemli ölçüde etkilediği, tekerlek izi direnci ve termal çatlak direncinde artış sağladığı tespit edilmiştir. Ayrıca CNT'ler bitümün yaşlanma direncini artırmaktadır.

Khatakt vd. (2012) tarafından karbon nano fiberler (CNF) ile bitüm modifiye edildiğinde, modifiye işlemi sonucunda bitümün yorulma dayanımının normal numunelere göre 2-3 kat arttığı, %2,5 CNF katkılı bitüm için yüksek sıcaklık rijitliğini ifade eden $G^*/\sin\delta$ tekerlek izi direnç parametresindeki artışın ise %35 olduğu tespit edilmiştir.

Vasilievici vd. (2012) tarafından asfalt beton yüzeyinde nano yapıları kaplamalarda kullanılmak üzere, toz halindeki volkanik tüf ve kalsiyum karbonat mekanik aşındırma yöntemi ile nano boyuta indirgenmiştir. Islak ve kuru ortamda katkı (stearik asit, polietilen glikol vb.) ve katkısız olarak yapılan mekanik öğütme işleminin ortalama tane çapına etkileri araştırılmıştır. Bu maksatla, seyreltik çözelti içerisindeki parçacıkların ortalama tane boyutlarının tespit edilebildiği, dinamik ışık saçılımı metodu (DLS) kullanılmıştır. Deney sonuçları, toz halindeki kalsiyum karbonat için; ıslak ve kuru yapılan öğütme neticesinde, en iyi sonuçların ıslak ortamda katkı kullanılmadan yapılan öğütme neticesinde elde edildiğini göstermektedir. Bu yöntemde ortalama nanoparçacık boyutu 86,3 nm olup, dar bir aralıkta boyut dağılımı elde edilmektedir.

Mahdi vd. (2013) tarafından bitüm %3, 5 ve 9 oranlarında iki farklı organik montmorillonit (OMMT) nanokil ile modifiye edilmiş, yaşlandırılmamış numuneler için 64°C sıcaklıkta, %9 katkı oranında, tekerlek izi direnç parametresindeki ($G^*/\sin\delta$) artış %200 ve %125 olarak elde edilmiştir.

Solanki ve Songera (2014) tarafından bitüm ağırlığınca %1 katkı oranında nano TiO_2 ile bitümün modifiyesi şeklinde yapılan çalışmada; penetrasyon deney sonuçlarına göre 50/60 olan bitüm sınıfı 40/50 olarak değişmiştir. Yumuşama noktası deney sonuçlarına göre, normal bitüme göre yumuşama noktasındaki artış %12'dir.

Nejad vd. (2014) tarafından yapılan çalışmada, bitümün tekerlek izi direncinin artırılması amacıyla TiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 ve ZnO gibi nano parçacıklar bitüm ağırlığınca %2, 4 ve 6 katkı oranlarında kullanılmıştır. 135°C sıcaklıkta gerçekleştirilen Brookfield viskozite deney sonuçlarına göre %6 TiO_2 , ZnO , Al_2O_3 ve Fe_2O_3 için normal bitüme kıyasla viskozitedeki artışlar sırasıyla %29, 21, 36 ve 26'dır. Her katkı malzemesinin %4 oranında kullanılması suretiyle hazırlanan BSK numuneleri üzerinde 300 kPa yük altında ve 50°C sıcaklıkta yapılan statik sünme deney sonuçlarına göre; nano Al_2O_3 ile modifiye

edilen numuneler, diğer numunelere göre en az sünmeyi göstermekte, toplam şekil değişimleri normal BSK numunelere kıyasla yaklaşık %30 daha az olmaktadır.

Shafabaksh vd. (2014) tarafından nano TiO_2 'nin bitüme ağırlıkça %1, %3, %5 ve %7 oranlarında katılması suretiyle bitüm modifiye edilerek hazırlanan asfalt beton numuneleri üzerinde dinamik sünme deneyi gerçekleştirilmiştir. Normal numunelerde nano TiO_2 modifiyeli numunelere göre daha fazla kalıcı deformasyon oluşmakta, 55 °C sıcaklık için, %5 nano TiO_2 oranında nihai şekil değişiminin %25 azaldığı görülmektedir. Nano TiO_2 ; asfalt betonu numunelerin yorulma kaynaklı çatlaklara dayanımını artırmakta, mikro çatlakların oluşumu ve ilerlemesini azaltmaktadır.

Karahançer vd. (2014) tarafından BSK performansının artırılabilmesi için plazma modifikasyon metodu kullanılmıştır. Kireçtaşı mineral fillerin yüzeyi üç farklı bileşen kullanılarak modifiye edilmiştir; metil metakrilat (MMA), heksametil disiloksan (HMDSO) ve silisyum tetraklorür (SiCl_4).

Mineral filleri plazma ile modifiye edilen asfalt beton numuneleri üzerinde Marshall stabilite ve indirek çekme dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiştir. MMA plazma modifiye numunelerde çekme dayanımındaki artış %30 oranındadır. Plazma modifikasyonu sonrası kireçtaşının yüzey alanı artmış, artan hava boşluğu nedeniyle asfalt beton karışımların nem hassasiyeti azaltılmıştır.

Jamshidi vd. (2015) tarafından yapılan çalışmaya göre, özellikle nano malzemeler ile modifiye sonrasında; farklı kaynaktan temin edilen değişik tipteki bitümler farklı reolojik özellikler gösterirler. Bu sebeple; nano modifiye bitüm performansındaki değişim, normal bitümün özelliklerine bağlı olarak farklılık gösterebilmektedir.

Galooyak vd. (2015) tarafından ılık karışım asfalt betonun fiziksel, mekanik ve reolojik özelliklerinin geliştirilebilmesi amacıyla, ortalama boyutu 20-30 nm olan nanosilika bitüm ağırlığınca %2, 4 ve 6 oranlarında kullanılarak bitüm modifiye edilmiştir. BSK üzerinde yapılan Hamburg tekerlek izi deney sonuçlarına göre %4 ve 6 nanosilika katkı oranlarında asfalt beton numunelerde tekerlek izi derinliklerindeki azalma sırasıyla %38 ve %48'dir.

Ezzat vd. (2016) tarafından nano silis dumanı (silika fume) ve nanokil (NC) kullanılarak, %3, 5 ve 7 katkı oranlarında $145\pm5^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta bir saat süreyle karıştırmak suretiyle modifiye bitüm numuneleri hazırlanmıştır. Normal bitüm penetrasyon değeri 55 iken, bitüme %3 oranında NC ilavesi ile penetrasyon değeri 33'e düşmektedir. Ancak %7 NC katkı oranında penetrasyon değeri 67'ye çıkmaktadır. Brookfield viskozite deney sonuçlarına göre; 135°C sıcaklıkta %7 nano silika fume (NSF) katkı oranında viskozite normal bitüme göre %210 artmaktadır. Ancak sıcaklık 165°C 'ye yükseltildiğinde bu artış %17'ye düşmektedir.

Ali vd. (2016) tarafından %3, 5 ve 7 katkı oranlarında nano Al_2O_3 ile bitümün modifiye edilmesi suretiyle yapılan çalışmada, %5 katkı oranı için 65°C ve 75°C sıcaklıkta $G^*/\sin \delta$ tekerlek izi direnç parametresinde normal bitüme kıyasla sırasıyla 5,3 ve 3,8 kat artış olmuştur. 25°C sıcaklıkta %5 katkı oranında $G^*.\sin \delta$ yorulma direnç parametresindeki azalma %16'dır.

Yao ve You (2016) tarafından karbon mikrofiber (MCF), nanomer, nanosilika (NS), modifiye edilmemiş nanokil (NMN) ve polimer modifiye nanokil (PMN) gibi beş farklı mikro ve nano katkı malzemesinin bitüm ağırlığınca %2, 4 ve 6 oranlarında kullanılması ile yapılan çalışmada asfalt betonu numuneleri hazırlanmıştır. Normal numunelere kıyasla; %4 MCF ve nanomer ile modifiye edilen numunelerde tekerlek izi derinliklerindeki azalma sırasıyla %20 ve %40'dır. %6 NS içeren numunelerde tekerlek izi derinliğindeki azalma %30, %4 NMN ve PMN için sırasıyla %110 ve %70'tir.

İskender (2016) tarafından üç farklı tipte nanokil (A-B-C) %2; %3,5 ve %5 oranlarında filler malzemesi yerine kullanılmak suretiyle asfalt beton karışımlarda modifiye edici olarak kullanılmıştır. Numuneler üzerinde indirekt çekme dayanımı, tekrarlı yük sünme ve marshall stabilite deneyleri gerçekleştirilmiştir. Kullanılan nanokil katkı oranı arttıkça, karışım yoğunluğunda azalma meydana gelmiştir.

BSK numunelerinin neme karşı hassasiyetinin tespit edilmesi amacıyla AASHTO T 283 standardına uygun olarak, Lottman şartlandırmasına maruz bırakılan (30 dakika 0,9 bar basınçlı vakumlu haznede suya doygun hale gelme ve 16 saat -18°C de dondurucuda

bekletme ve sonrasında 24 saat 60°C su banyosunda bekletme) normal ve nanokil modifiye karışımlar üzerinde indirekt çekme dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiştir. Şartlandırma sonrası normal numunelerin ortalama çekme dayanımı 8,31 kN iken, %2 Nanokil A modifiye numune için bu değer 13,02 kN'dir. Yani %2 Nanokil A modifiye numunenin çekme dayanımı normal numuneye göre % 56,8 daha fazladır. Çekme dayanımı oranları için; her üç nanokil modifiye karışım için de %2 katkı oranında daha yüksek değerler elde edilmektedir. Bu değerler Nanokil A, B ve C için sırasıyla; 1,13; 0,85 ve 0,73'tür. Ayrıca normal ve modifiye numuneler üzerinde tekrarlı sünme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Neticede kullanılan nanokil çeşitleri için yaklaşık %50 daha az kalıcı deformasyon olduğu tespit edilmiştir.

BSK'lardaki nem hassasiyetinin azaltılabilmesi, bitüm ve agrega arasındaki adezyonun geliştirilebilmesi için, mevcut yöntemlerden biri agrega polaritesinde değişiklik yaratmak amacıyla agreganın uygun malzemeler ile kaplanmasıdır. Hamed (2018) tarafından yapılan çalışmada; termodinamik ve mekanik metodlar yardımıyla agreganın nanomalzemeler ile kaplanması suretiyle nem hassasiyetindeki değişim araştırılmıştır. Agregada olarak granit ve kalker kullanılmış olup, ortalama dane boyutu 20-60 nm arasında olan demir oksit ve alüminyum oksit nanoparçacıklardan yararlanılmıştır. Bu amaçla, bir birim ağırlıktaki nanomalzeme 20 birim ağırlığındaki su ile 200 rpm hızındaki mikser yardımıyla karıştırılmak suretiyle, sıvı bir harç hazırlanmıştır. Daha sonra hazırlanan bu sıvı harç içerisine agrega ilave edilerek karıştırılmaya devam edilmiştir.

İndirekt çekme dayanım (ITS) sonuçlarına göre, her iki nanomalzemenin kullanımı ile yaş ve kuru numunelerde ITS değerlerinin arttığı tespit edilmiştir. Granit türü agregada demir oksit nanoparçacık kullanımı halinde ITS değerlerindeki bu artış daha belirgindir. Granit türü agrega ile hazırlanan BSK numunelerinde, demir oksit ve alüminyum oksit nanoparçacıkları kullanıldığı takdirde, kuru haldeki kontrol numuneleri için 1256 kPa olan ITS değerinin sırasıyla 1290 ve 1270 kPa'a yükseldiği tespit edilmiştir.

Saltan vd. (2018) tarafından yapılan çalışmada, bitüm ağırlıkça %1, 3 ve 5 katkı oranlarında çok duvarlı karbon nanotüp (MWCNT) ve %50 oranında SiO₂ karıştırılmış karbon nanotüpler (SiO₂ katkılı CNT) ile modifiye edilmiştir. Dönel viskozimetre deney sonuçlarına göre; %1 katkı oranında SiO₂ katkılı CNT ve %1 ile %3 katkı oranlarında

MWCNT ile modifiye edilen bitüm numunelerinde viskozite normal bitüme kıyasla daha düşüktür. RTFOT ile kısa dönem yaşlanma sonrası en yüksek tekerlek izi direnci %5 SiO₂ katkı CNT ile modifiye edilen numunelerde elde edilmiş olup, normal bitüm numunelerine göre artış %10,1 mertebesindedir. %3 SiO₂ katkı CNT ile modifiye edilen numunelerde en yüksek yorulma dayanımı elde edilmiş olup, normal bitüm numunelerine kıyasla artış %37,7'dir. %3 SiO₂ katkı CNT ile modifiye edilen bitüm ile hazırlanan BSK numunelerinde, normal bitüm BSK numunelerine kıyasla nem dayanımındaki artış %17,5'dir.

Türkiye'de bor kullanılarak yapılan çalışmalar incelendiğinde; Çubuk vd. (2012) tarafından sentezlenen organik esaslı magnezyum bileşiğinin bitüme ağırlıkça %0,1 oranında katılması ile; bitümün G*/Sin δ tekerlek izi direnç parametresinin %9 arttığı ancak yorulma çatlak direncinde önemli oranda değişim olmadığı tespit edilmiştir.

Laboratuvar ortamında kimyasal olarak sentezlenen trietilen glikol esaslı poliboron (TEGPB)'un 50/70 penetrasyon bitüme %1, 2, 3 ve 5 oranlarında katılması ile yapılan çalışmada; 50°C sıcaklık için %5 katkı oranında normal bitüme kıyasla viskozitede %24,3 artış olduğu tespit edilmiştir. TEGPB ile modifiye neticesinde; 64°C sıcaklık için G*/Sin δ tekerlek izi direnç parametresindeki artış %22,93'tür (Arslan vd., 2014).

50/70 penetrasyon bitüme laboratuvar ortamında kimyasal olarak sentezlenen organik esaslı borik asit bileşiğinin (OBBAC) %1, 2, 3, 5 ve 10 oranlarında ilave edilmesi ile bitümün modifiyesi neticesinde; 90°C sıcaklıkta viskozitedeki azalma %52,2 mertebesindedir. Optimum katkı oranı olan %3 oranında modifiye bitüm için S/m (sünme rijitliği/sünme oranı) oranında %23,0 azalma olmakta, bir başka deyişle modifiye işlemi ile bitümün düşük sıcaklık çatlaklarına karşı direnci artmaktadır (Arslan vd., 2014).

Oruç vd. (2015) tarafından yapılan çalışmada, laboratuvar ortamında kimyasal olarak sentezlenen; Triazole Borat Ester Etanol (TBEE), Triazole Borat Ester Butanol (TBEB), Triazole Borat Ester Oktanol (TBEO) ve Triazole Borat Ester Oktanol- Sülfirik asit (TBEO_{SA}) isimli dört farklı ve yeni bor içeren katkı bitüme ağırlıkça %1 oranında katılmak suretiyle bitüm modifiye edilmiştir. TBEO_{SA} ile modifiye işlemi diğer üç katkıya kıyasla en etkin sonuçları vermiş, normal bitüme kıyasla penetrasyon değerinde %26

azalma, yumuşama noktasında ise % 7 artış elde edilmiştir. TBEO_{SA} ile modifiye neticesinde bitümün kompleks kayma modülü değeri %49,5 artmaktadır.

Şeker pancarı melası ve melas esaslı bor oksit bileşiğinin (MBOC) 50/70 penetrasyon bitüme %1; 2; 3; 5; 7,5 ve 10 oranlarında ilave edilerek bitümün modifiye edilmesi suretiyle yapılan çalışmada; her iki modifikasyon neticesinde bitümün yorulma dayanımı artırılmıştır. 25°C sıcaklıkta normal bitüm için 4701 kPa olan G*.Sin δ değeri, %5 melas için 4142 kPa, %10 MBOC için 4359 kPa'dır (Gürü vd., 2016).

Nanoteknolojinin asfalt betonuna uygulanmasına yönelik araştırmalar devam etmekte olup, yol projelerinde uygulamalar henüz çok sınırlıdır. Ancak, şu ana kadar elde edilen sonuçlar çerçevesinde, nanoteknolojinin bitüm esaslı malzemelerin performansını ve durabilite özelliklerini iyileştireceği, halihazırda bitüm modifiyesinde kullanılan ve ticari olarak satılan katkıların yerini alabileceği değerlendirilmektedir.

3. BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIMLAR

Yüksek standartlı karayolları ve havaalanlarında yapılacak esnek kaplamalar için BSK'lar (asfalt betonu) kullanılmaktadır. BSK, kırılmış ve elenmiş kaba agreg, ince agreg ve mineral fillerin belli gradasyon limitlerinde belli bir tasarıma uygun olarak bitüm ile plentte karıştırılması sonucunda elde edilir. Yani BSK'lar esasen mineral agreg ve bitüm'den ibarettir.

İstenilen özellikte ve iyi performans gösterecek BSK geliştirilebilmesi için bitüm ve agreganın uygun oranlarda kullanılması önemlidir. Bu şekilde esnek kaplamalarda görülen başlıca üç bozulma olan; kalıcı deformasyon, yorulma ve düşük sıcaklık çatlaklarına direnci yüksek üstyapıların inşası mümkün olabilecektir (Tam, 2006).

BSK, bitümün viskozitesinin azaltılması için ısıtılması ve karıştırma öncesi agreganın kurutularak içindeki nemin uzaklaştırılması suretiyle üretilir. Agreg ile karıştırma işlemi genellikle normal bitüm için yaklaşık 150-160°C (yaklaşık 300°F) ve polimer modifiye bitüm için 165°C (330°F) sıcaklıkta gerçekleştirilir. Serme ve sıkıştırma işlemi asfalt betonu yeterince sıcak olduğu zaman yapılmalıdır (Speight 2015).

3.1. Agreg

Agreg, asfalt betonun kütlece %92-96'sını, hacim olarak ise yaklaşık %75-85'ini oluşturan en büyük bileşendir. Agreganın cinsi, mineralojisi, fiziksel ve kimyasal özellikleri asfalt betonunun performansı üzerinde önemli etkiye sahiptir (Tam, 2006; Speight 2015).

Asfalt beton kaplamalarda kullanılacak agreg malzemesinin seçiminde aşağıda belirtilen hususlar dikkate alınır: (Speight 2015)

- Agreganın temin durumu,
- Maliyet,
- Malzemenin kalitesi,
- İnşa edilecek kaplama cinsi.

3.1.1. Agregaların sınıflandırılması

3.1.1.1. Mineralojik sınıflandırma

EN 13043 “Yollar, havaalanları ve trafiğe açık diğer alanlardaki bitümlü karışımlar ve yüzey uygulamalarında kullanılan agregalar” standardı agregayı inşaatta kullanılan granüler malzeme olarak tanımlamakta ve üç çeşide ayırmaktadır. Bunlar; doğal, üretilmiş (yapay) ve geri dönüştürülmüş agregalar’dır.

Doğal agregalar; mekanik bir işlem dışında (Kaya, çakıl kırılması vb.) hiçbir işleme tabi tutulmayan ve kaynağından temin edilen agregalardır. Yapay agregalar; ısısal veya diğer bir modifikasyon (Yüksek fırın cürufu, çelik cürufu vb.) ile endüstriyel işlem neticesinde elde edilen agregalardır. Geri dönüştürülmüş agregalar; inşaatta daha önce kullanılan malzemenin işlenmesiyle elde edilen agregalardır (Geri dönüştürülmüş asfalt betonu).

Asfalt beton üretiminde kullanılan başlıca üç çeşit kayalar olup, bunlar; volkanik, tortul ve metamorfik kayalardır. Volkanik kayalara; bazalt, dolerit, granit, andezit, tortul kayalara; kireçtaşı, dolomit, kumtaşı, metamorfik kayalara; meta kuvarzlit örnek olarak verilebilir (Hunter vd. 2015).

Magmatik kayalar; yeryüzünün derinliklerinden yüzeye fırlanmış olan magmanın soğuyup kristalleşmesi sonucu oluşur. Magmanın soğuma ve katılaşması yüzeyde meydana gelirse, ortaya çıkan kayalara volkanik kayalar denir. Tortul kayalar; değişik kayaların parçalanması, aşınması ve dağılan parçaların katı yada eriyik halde rüzgar ve su gibi etkilerle sürüklenmesi, deniz veya göl dibi gibi sedimentasyon havzalarında tortullaşması ve daha sonra bunların katılaşmasıyla oluşan taşlardır. Metamorfik kayalar; magmatik veya tortul kayaların yüksek ısı, yüksek basınç, su buharı ve türlü bileşimdeki gazların etkisi ya da mekanik olarak şekil değiştirmeyeyle değişik bir yapı-doku ve mineralojik bileşim kazanması sonucunda oluşur (İSFALT, 2001).

3.1.1.2. Boyut sınıflandırması

Agregalar boyutlarına göre üç grupta incelenir:

- Kaba agregası: No.4 (4,75 mm) eleğin üzerinde kalan kısım,
- İnce agregası: No.4 elekten geçen ve No.200 (0,075 mm) elek üzerinde kalan kısım,
- Mineral Filler: No.200 elekten geçen kısımdır (İSFALT, 2001; Papagiannakis ve Masad, 2008).

3.1.1.3. Gradasyon (Dane dağılımı) sınıflandırması

Agrega karışımlarındaki agregası danelerinin boyutları dikkate alınarak ve toplam ağırlığın %'si olarak ifade edilen dane boyutu dağılımına gradasyon denir. EN 933-2, ASTM C136 ve C117, AASHTO T 27 ve T 11 agregası dane dağılımının tespitine yönelik standartlardır. Agregası gradasyonu karışımın stabilite, don duyarlılığı ve işlenebilirlik özelliğini belirler. Genel olarak, karışımındaki maksimum boyut 1" (25,4 mm)'den fazla ise işlenebilirlik zorlaşırken yoğunluk ve stabilite artmaktadır.

Asfalt beton kaplamaların tabaka kalınlığı arttıkça kullanılacak agreganın maksimum dane boyutu da artmaktadır. Genel bir kural olarak; bir defada serilip sıkıştırılmış tabakanın kalınlığı, karışımındaki d_{max} 'ın 1,5 katından az ve 3 katından fazla olmamalıdır.

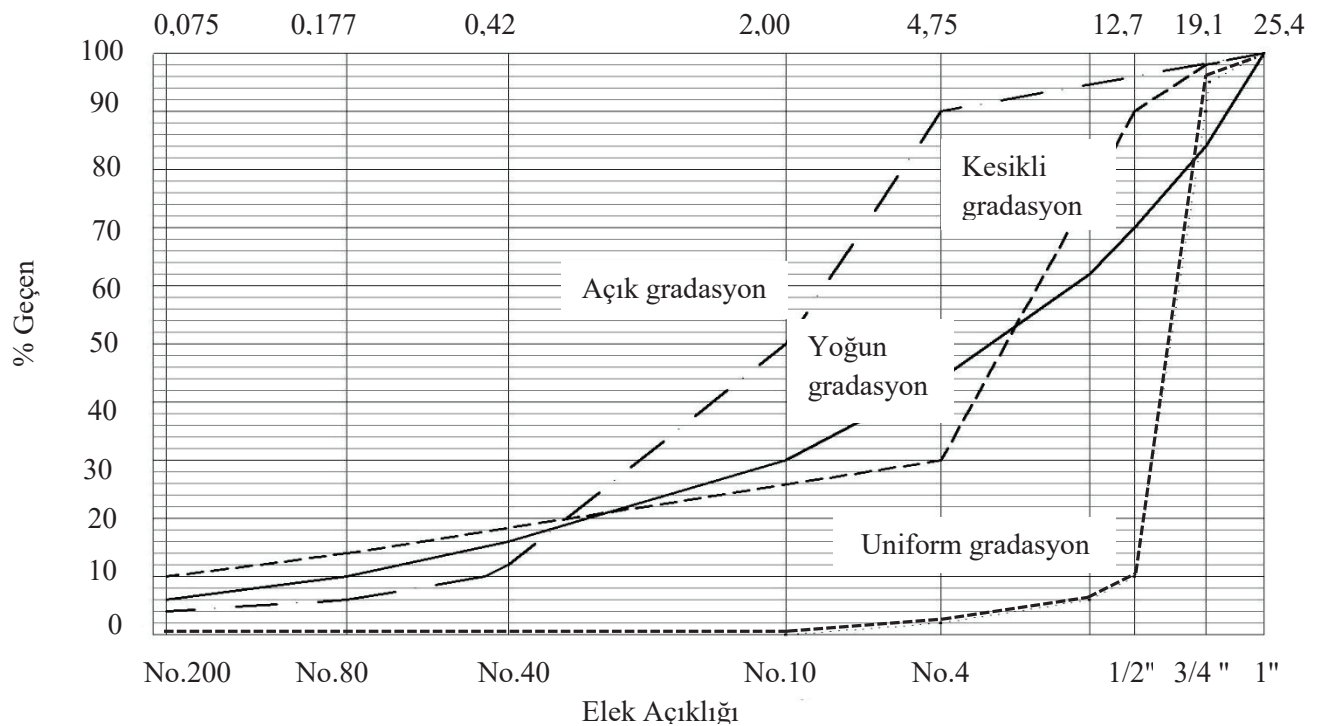
Agregalar gradasyon yönünden aşağıdaki gibi sınıflandırılır: (Papagiannakis ve Masad, 2008) Farklı agregası gradasyon örnekleri Şekil 3.1' de gösterilmiştir.

- Kesikli gradasyon,
- Yoğun (iyi) gradasyon,
- Açık gradasyon,
- Tek boyutlu (üniform) gradasyon

Kesikli gradasyon belirli aralıktaki dane çaplarını ihtiva etmediğinden dolayı boşluk miktarı fazladır. Yol inşaatında genel olarak kullanılmamaktadır.

Yoğun (iyi) gradasyon elek analiz grafiğinde sürekli bir eğri gösterir ve minimum boşluk (maksimum yoğunluk) ihtiva eder. Zira yoğun bir gradasyonda en kaba malzemeden en ince malzemeye kadar olan agrega boyutları birbirlerinin boşluklarını dolduracak kadar uygun oranlarda olduğundan karışımın yoğunluğu artmaktadır.

Açık gradasyon ince agrega ihtiva etmediğinden dolayı karışımın boşluk oranı yüksektir. Drenaj, filtre vb. amaçlar ile dona duyarlı tabakalar için kullanılırlar.



Şekil 3.1. Farklı agrega gradasyon örnekleri (Papagiannakis ve Masad, 2008; Tam, 2006)

Hemen hemen aynı boyuta sahip agregalardan oluşan tek boyutlu (üniform) gradasyon tipi, sathi kaplama ve koruyucu-örtü tabakası gibi düşük standartlı yol kaplamalarında kullanılmaktadır (Tunç, 2007).

3.1.1.4. Biçim sınıflandırması

Agrega dane şeklinin tayininde kullanılan deneyler yassılık indeksi ve şekil indeksidir. Daha çok kırılmış agregalar üzerinde uygulanırlar. Kırılmış bir agreganın şekli

taşın yapısı ve kırılma süreci (kırım aşamaları, kırıcı tipi ve ilk kırıcıyı beslemek için kullanılan kaya ebatları) ile ilişkilidir.

Yassılık indeksi deneyi, EN 933-3 standardına göre yürütülür. Nominal çapı 80 mm'den küçük ve 4 mm'den büyük agregalar deneyde kullanılır. Şekil indeksi deneyi EN 933-4 standardına göre yürütülür. Agregada daneleri, kumpas kullanılarak tek tek uzunlukları (L) ve kalınlıklarına (E) göre sınıflandırılır. Şekil indeksi, boyutları oranı $L/E \geq 3$ olan agregada ağırlığının, deneyde kullanılan agreganın toplam kuru ağırlığının %'si olarak ifade edilmesidir (Woodside, 1998; Nikolaides, A., 2015).

Agregada danelerinin biçimleri yol kaplamalarında kullanılan karışımların; sıkışma direnci, işlenebilirlik, yoğunluk, stabilite, içsel kilitleme ve içsel sürtünme açısı, kayma mukavemeti ve CBR özelliklerine etki ederler. Yuvarlak biçimli agregaların açısallık (köşeli) biçimli agregalara kıyasla işlenebilirlik özelliği daha yüksek iken, stabilite yönünden açısallık biçimli agregalar yuvarlak biçimli agregalara kıyasla daha üstündür (Tunç, 2007).

3.1.1.5. Yüzey yapısı sınıflandırması

Agregaların dane şeklinde olduğu gibi yüzey yapısı da işlenebilirlik, sıkıştırılabilirlik ve asfalt beton karışımların dayanımına etki eder. Pürüzlü yüzey yapısı asfalt beton karışımların dayanımını artırsa da, işlenebilirlikteki kaybın önüne geçilebilmesi için ilave bitüm gerektirir (Speight, 2015).

Pürüzlü yüzey yapısına sahip agregalar yüksek içsel sürtünmeye, daha yüksek hava boşluğuna ve daha yüksek agregalar arası boşluk oranına (VMA) sahiptir. Ayrıca pürüzlü agregalarda bitüm ile agregada arasında daha iyi adezyon mevcuttur. Agregada yüzey yapısının bir diğer boyutu da yüzey alanının miktarıdır. Genellikle, yüzey ne kadar pürüzlü ise yüzey alanı da o derece büyüktür. Bu nedenle, pürüzlü agregada danelerinin film tabakası ile kaplanabilmesi için daha fazla bitüm gerekir (Chadbourn vd., 2000).

Ağır trafik yükleri taşıyan, tekerlek izi ve deformasyon direnci yüksek asfalt beton karışımlar genellikle hem kaba hem de ince agregada olarak pürüzlü yüzey yapısına sahip, köşeli agregalar içerirler (Asphalt Institute, 2007).

3.1.1.6. Porozite sınıflandırması

Porozite agregada danesindeki toplam boşluk hacmidir. Yüksek porozite daha düşük agregada dayanımı, düşük yoğunluk ve özgül ağırlığa neden olabilir (Asphalt Institute, 2007).

Agregada danelerinin porozitesinin belli miktarda olması gerekir. Yeterli poroziteye sahip agregada daneleri bitümün emilmesine olanak sağlayacağından, agregada ile bitüm film tabakası arasında kuvvetli bir adezyon oluşturarak stabilitenin artmasını sağlar ve suyun etkisi ile film tabakasının soyulmasını önler (Tunç, 2007).

3.1.1.7. Özgül ağırlık sınıflandırması

Agregada ağırlığının, agreganın su içerisinde kapladığı hacme oranı yoğunluk olarak tanımlanır ve ölçü birimi g/cm^3 veya t/m^3 'tür.

Bir agreganın özgül ağırlığı; birim hacimdeki agreganın ağırlığının aynı hacimde 23°C 'deki suyun ağırlığına oranı olarak tanımlanır. Bulunan değer boyutsuzdur. Her iki durumda da agregada hacmi sonucu etkilemektedir (Mallick ve Korchi, 2013; Tunç, 2007; Speight 2015).

Agregada danelerinin yoğunluğu ve su absorpsiyonunun tayininde kullanılan kullanılan Avrupa standardı EN 1097-6'dır. İlgili Amerikan standartları ise, ASTM C127 ve C128 AASHTO T 84 ve 85'dir. Her iki standart da agreganın boyutuna bağlı olarak hacminin tayini için tel sepet veya piknometre kullanmaktadır.

31,5 mm'lik eleği geçen ve 0,063 mm'lik elek üzerinde kalan agregaların deneyi piknometre yardımıyla yapılır. Ancak, 4 ile 31,5 mm arasındaki agregaların yoğunluğunun tayininde tel sepet yöntemi de kullanılabilir. İhtilaf durumunda piknometre referans metoddur (Nikolaides, A., 2015).

Agregalar; Zahiri Özgül Ağırlık, Hacim Özgül Ağırlığı ve Yüzey kuru- suya doymun Özgül Ağırlık olmak üzere üç farklı özgül ağırlığa sahiptir. Zahiri özgül ağırlık; belirli bir sıcaklıkta agreganın geçirimsiz boşluklarını içeren birim hacminin havadaki

ağırlığının, aynı sıcaklıkta ve aynı hacimdeki havası alınmış distile suyun ağırlığına oranıdır (Garber ve Hoel, 2009).

Hacim özgül ağırlığı; belirli bir sıcaklıkta agreganın geçirgen olan ve olmayan boşluklarını içeren birim hacminin havadaki ağırlığının, aynı sıcaklık ve hacminin havadaki ağırlığının, aynı sıcaklıkta ve aynı hacimdeki havası alınmış distile suyun ağırlığına oranıdır (Papagiannakis ve Masad, 2008; Garber ve Hoel, 2009; Mallick ve Korchi, 2013; Hossain, 2016).

Efektif özgül ağırlık; belirli bir sıcaklıkta agreganın bitüm geçirimli boşlukları hariç geçirimli ve geçirimsiz boşluklarını içeren birim hacminin havadaki ağırlığının, aynı sıcaklık ve hacimdeki havası alınmış distile suyun ağırlığına oranıdır (Hossain, 2016; Orhan, 2012).

Yüzey kuru- suya doygun özgül ağırlık; geçirimli boşluklardaki suyun ağırlığı da dahil olmak üzere, agrega ağırlığının aynı hacimdeki suyun ağırlığına oranıdır (Papagiannakis ve Masad, 2008).

Agreganın porozitesinin tayin edilmesi sıklıkla gerekli olmakla beraber boşluk hacminin ölçülmesi zordur. Porozite ile agreganın hacim, zahiri ve efektif özgül ağırlıkları arasında korelasyonlar yapılabilir.

Ayrıca belirli bir agrega için özgül ağırlık bilgisi BSK'da gerek duyulan bitüm miktarının tayininde gereklidir. Agregada fazla porozite ise, plentteki ilk karıştırma işleminden, BSK tamamen soğuyuncaya kadar olan süreçte bitüm absorbe etmeye devam eder. Bu süreç yeterli bağlanmanın sağlanabilmesi için az bitüm bırakır, bu nedenle poroz bir agrega daha az poroz olana göre daha fazla bitüm gerektirir.

Bitüm-agrega karışımı tasarlanırken, agrega ve bitümün hem kütle hem de hacmi bilinmelidir. (AASHTO T 85) Ayrıca, hava boşluk miktarının tayin edilmesi hacimsel analizin asıl amaçlarından biridir. Ancak asfalt beton numunenin hava boşluğu miktarının tayininde kullanılabilecek basit ve direkt bir yol yoktur. Hava boşluk miktarı; sıkıştırılmış

numunenin özgül ağırlığının, o numuneyi hazırlamakta kullanılan karışımın maksimum teorik yoğunluğu ile karşılaştırılması ile tayin edilir (Speight, 2015).

3.1.2. Agregaların fiziksel özellikleri

- Absorbsiyon (Su emme)

Kaba ve ince agreganın absorpsiyonu ve özgül ağırlığı sırasıyla ASTM C127 ve C128 standartlarına göre belirlenir. Bu deneyler Arşimed prensibine dayanmakta olup; su içerisine batırılan bir katı, yer değiştirdiği suyun ağırlığına eşit bir dikey kuvvete maruz kalır (Papagiannakis ve Masad, 2008).

Agrega absorpsiyonu, agregaya suya daldırıldığında absorbe edeceği su miktarıdır. Bir agregaya; poroz ise bitüm absorbe edecektir. Agregaya tarafından absorbe edilen bitüm miktarı BSK özelliklerini önemli ölçüde etkiler. Bitümün viskozitesi ve agregaların yoğunluğunun hidrofilik (su seven) olması gerçeği değerlendirildiğinde, agregaya sudan daha az bitüm absorbe edecektir. Eğer bir agregaya bitümü çok fazla absorbe ediyorsa, karışımın adezyonu daha az olacak, yerleştirme ve sıkıştırılması zorlaşacaktır. Ayrıca karışımındaki agregaya üzerinde bitüm film tabaka kalınlığı düşük olacağından, bu durum karışımda durabilite problemlerine neden olabilecektir (Lavin, 2003).

Agreganın porozitesi, agreganın bitüm absorbe etmesi ve agregaya tanesi ile bitüm arasında bağ oluşturulmasına izin verir. Bir dereceye kadar porozite arzu edilir fakat porozitesi yüksek olan agregalar genellikle kullanılmazlar (Hicks vd., 2003).

BSK üretiminde yüksek su içeriğine sahip agregalar kullanıldığında; asfalt beton üretimi esnasında, gözeneklerdeki suyun buharlaştığından veya agregaya tarafından yeterli miktarda bitümün emildiğinden emin olunabilmesi için daha fazla zaman gerekmektedir (Speight, 2015).

- Yüzey yapısı

Agrega danelerinin yüzey yapısı asfalt beton karışımların işlenebilirliği ve durabilitesine etki eder. Yüzey yapısı agrega jeolojisi ve mekanik işleme ile yakından ilişkilidir. Kırılmış taş ve yapay agregaların çoğu genellikle pürüzlü bir yapıya sahip iken, dere malzemeleri pürüzsüz bir yapıya sahiptir (Lavin, 2003).

İşlenebilirlik ve kaplama mukavemeti yüzey yapısından etkilenir. Pürüzlü bir yapı ile düzgün bir dokuya kıyasla daha yüksek mukavemet elde edilebilir. Her ne kadar düzgün yüzeyli agregaların bitüm filmi ile kaplanması kolay olsa da, genellikle pürüzlü yüzeyler kadar iyi değildirler. Bitümün düzgün yüzeyi kavraması daha zor olmaktadır (Acar, 2011).

Agreganın yüzey yapısı sürtünme direncine katkı yapan oldukça önemli bir unsurdur. Ayrıca yüzey yapısı BSK'nın tekerlek izi dayanımı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Agreganın yüzey yapısı ne kadar pürüzlü ise, asfalt beton karışımının tekerlek izi dayanımı o kadar iyidir. Ancak, inşaat esnasında pürüzlü bir yüzeye sahip agregaya içeren BSK'yı istenilen yoğunlukta sıkıştırabilmek için gerekli olan sıkıştırma enerjisi, düzgün yüzeyli agregaya içeren BSK'ya göre daha fazladır (Speight, 2015).

- İnce ve kaba agreganın köşeliliği

İnce agreganın köşeliliği ASTM C1252 standardı kullanılarak ölçülebilir. Bu standart genellikle ince agreganın köşeliliği deneyi olarak adlandırılır. Belirli bir hacme sahip haznenin ucundaki orifisten sabit mesafeden düşen gevşek-sıkıştırılmamış ince agreganın numunesinin porozitesi (boşluk hacminin toplam hacme bölünmesi) ölçülür. Düşük poroziteye, daha yuvarlak ve düzgün yüzeyli ince agreganın daneleri neden olur. Bu standart Superpave tarafından, tekerlek izi direnci yüksek BSK'ların üretilmesi için, ince agregaların yeterli içsel sürtünmeye sahip olup olmadığından emin olunması için agreganın köşeliliğinin tayininde kullanılır (Papagiannakis ve Masad, 2008).

İnce agreganın köşeliliği No.8 (2,36 mm) eleği geçen gevşek sıkıştırılmış agreganın numunesinde mevcut hava boşluklarının yüzdesidir. Bu özellik AASHTO T 304, EN 933-6 kullanılarak tayin edilir (Tam, 2006).

Kaba agregası köşeliliği No.4 (4,75mm) elek üzerinde kalan ve bir veya daha fazla kırık yüzü olan agregaların ağırlıkça yüzdesidir. Bu özellik ASTM D5821 ve AASHTO T 326 kullanılarak tayin edilir (Papagiannakis ve Masad, 2008).

Asfalt Enstitüsü bu deneyi BSK'nın içsel sürtünme ve tekerlek izi direncinin değerlendirilmesinde bir ölçüt olarak kabul etmektedir. Herhangi bir kırık yüz, agregası danesi kesit alanının en az %25'i kadar alanı kapladığı takdirde kırık yüz olarak dikkate alınmaktadır (Chadborn vd., 2000).

Agregası tanelerinin şekli, asfalt beton karışımların toplam mukavemet ve işlenebilirliği kadar sıkıştırma esnasında elde edilebilecek yoğunluğunu da etkiler.

- Düz ve ince-uzun parçacıklar

Düz ve ince-uzun parçacıklar üretim ve inşaat esnasında kırılmaya meyilli olduğundan BSK'larda bulunması arzu edilmez. Üretim ve inşaat esnasında kırılan agregası daneleri asfalt betonun dayanıklılığının azalmasına neden olduğu gibi kaplama yüzeyinde sökülme, çanak şekilli çukur vb. bozulmalar görülebilir (Speight, 2015; Chadborn vd., 2000).

Superpave karışım tasarım yönteminde, genişliği ile kalınlığı veya uzunluğu ile genişliğinin oranı 5'e 1 oranını geçen agregaları düz ve ince-uzun olarak kabul edilir. Bu özellik ASTM D4791 kullanılarak tayin edilir. Bu deney No.4 elek üzerinde kalan agregalara uygulanır (Mallick ve Korchi, 2013; Tam, 2006).

- Kil içeriği (Kum eşdeğer deneyi)

Kil içeriği, No.4 (4,75 mm) eleği geçen agregası içerisindeki kil malzeme yüzdesidir. Bu özellik EN 933-8, ASTM D2419 veya AASHTO T 176 kullanılarak tayin edilir. Agregadaki kil miktarının sınırlandırılabilmesi için kum eşdeğer deneyi kullanılır. Düşük bir kum eşdeğer değeri veya yüksek kil içeriği agregaların yüzeyinde kir olduğu anlamına gelmektedir. Bu kir agregası ile bitüm arasındaki adezyonu azaltabilir. Sonuç olarak;

karışımın soyulma eğilimi daha fazla olmaktadır. Yüksek kum eşdeğer değeri olan temiz agregalar BSK'nın performansını geliştirecektir (Nikolaides, A., 2015).

İnce agregada kil mevcut olmasının BSK'nın su hassasiyeti üzerinde zararlı etkileri olabilmektedir. Kil varlığı durumunda agregayı saran kil mineralleri, bitümün agregada danelerinin yüzeyine tamamen bağlanmasına engel olur. Bu durum BSK'da su hasarı oluşması riskini artırır (Speight, 2015).

EN 933-8'e göre deney 2 mm'lik eleği geçen malzeme üzerinde uygulanır. 2 mm'lik elek üzerinde kalan topaklar varsa, bunlar ufalanmalı ve deneye dahil edilmelidir. Avrupa ve Amerikan standartları arasındaki farklar; deneyde kullanılan ince agrega boyutları, deneyde kullanılan malzeme ağırlığı, aynı anda yürütülen deney sayısı ve deney sonuçlarının ifadesidir. Amerikan standardında 4,75 mm'lik eleği geçen malzeme kullanılırken, Avrupa standardında 2 mm'lik eleği geçen malzeme değerlendirilir. Avrupa standardına göre deneyde 120 g ağırlığında numune kullanılırken, Amerikan standardında bu değer hacimsel olarak belirlenmiş ve yaklaşık 85 ml'dir (Nikolaides, A., 2015).

- Agregada gradasyonu

Agregada gradasyonu toplam numune ağırlığının yüzdesi olarak dane boyutlarının dağılımı olarak ifade edilebilir. Bu özellik AASHTO T 27 kullanılarak tayin edilir (Tam, 2006).

- Durabilite

Agregada danelerinin trafik ve çevre etkilerinin aşındırmasına karşı dirençli olmaları gerekir. Agregada danelerinin durabilitesi kırılma, aşınma ve parçalanmalara karşı gösterdiği direnç olarak tanımlanır.

Agregalar sıkıştırma ve trafik yükleri altında mekanik etkilerle kırılmaya maruz kalırlar. Bu nedenle, kaplamanın üst tabakalarında kullanılan agregalar alt tabakalarda kullanılan agregalara kıyasla kırılmaya karşı daha dayanıklı olmalıdır (Tunç, 2007).

Aşınma, tekrar eden trafik yükleri altında agrega danelerinin çok küçük parçalar halinde (No.100 ve 200) ufalanmasıdır. Aşınma ile ince malzeme miktarı artarak agrega gradasyonu bozulur ve dren kabiliyeti azalır.

Parçalanma, agrega danelerinin mekanik etkilerden çok fiziko-kimyasal etkiler ile parçalanmasıdır. Bu tip aşınma, suyun etkisi, agreganın porozluğu ve mineralojik yapısı ile ilgilidir. Agrega danelerinin emdiği suyun donması sonucu yaptığı hacim genişlemesinin yarattığı ilave gerilmeler ve donma-çözünme periyotlarının sıklığı ile agrega daneleri parçalanmaya maruz kalırlar (Tunç, 2007).

- Sağlamlık

Durabiliteye benzer olmasına rağmen, sağlamlık agreganın hava gibi doğal nedenlerin sebep olduğu bozulmalara dayanma kabiliyetidir (Hicks vd. 2003).

- Nem hassasiyeti

Nem hasarı; asfalt beton karışımlarda bitüm ve agrega yüzeyi arasındaki adezyon kaybı ve/veya büyük oranda suyun etkisine bağlı olarak bitüm bünyesindeki kohezyon kaybı nedeniyle oluşan ve giderek artan bozulmalardır.

Suyun etkisi ile bitüm film tabakasının agregadan ayrılmasına soyulma adı verilir. Ayrıca çok fazla toz ile kaplı olan agregalarda da zayıf bağ nedeniyle soyulma görülür (Hicks vd. 2003).

3.1.3. Agregalara uygulanan deneyler

Asfalt betonlarında kullanılan agregaların dane dağılımı, aşınma ve donmaya karşı dirençleri, su absorpsiyonu, dane şekli, porozitesi, dane yüzey dokusu gibi fiziksel özellikleri, yol kaplamalarının ömrü, dayanımı ve performansı üzerinde etkilidir. Bu nedenle karayolu üstyapısında kullanılacak agregaların fiziksel ve kimyasal özelliklerinin karışıma katılmadan önce bilinmesi gerekmektedir. Bu kapsamda agregalar üzerinde yapılan deneyler ve deneylerin yürütülmesinde kullanılan standartlar aşağıda sıralanmıştır.

3.1.3.1. Elek analizi deneyi (EN 933-1/2, AASHTO T 11, AASHTO T 27, ASTM C136)

Elek analizi deneyi; bir agregâ karışımının standart eleklerden elenmesi yolu ile en büyük büyük dane çapı bağlamında; söz konusu elekten geçen kısmının tüm agregâ miktarına oranının yüzde cinsinden bulunması amacı ile yapılır. Eleme işlemi elle yada eleme makinasıyla yapılır.

Deney sonucu bulunan gradasyon sınıflandırmada, gradasyonun şartnameye uygunluğunun kontrolünde ve agregâ karışım oranlarının hesabında kullanılır. Deney numunesi agregânın maksimum dane boyutuna göre Çizelge 3.1' de verilen miktarlarda temsili olarak dörtleme metodu ya da bölgeç ile alınır ve $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ 'lik etüvde veya havada kurutulur.

Bir bitümlü kaplamada kullanılacak agregânın elek analizi için genellikle 25 mm (1"), 19 mm (3/4"), 12,7 mm (1/2"), 9,5 mm (3/8"), 4,75 mm (No.4), 2,00 mm (No.10), 0,425 mm (No.40), 0,177 mm (No.80), 0,075 mm (No.200) göz açıklığı olan elekler kullanılır. Elek analizine girecek numune miktarı, kullanılacak en büyük tane boyutuna göre seçilir.

Çizelge 3.1. Agregâ dane boyutlarına göre numune ağırlıkları (Advanced Asphalt Technologies, 2011)

Nominal maksimum boyut	Minimum deney numunesi ağırlığı
mm, (inç)	kg
4,75 (No.4)	0,50
9,5 (3/8)	1
12,5 (1/2)	2
19,0 (3/4)	5
25,0 (1)	10
37,5 (1 1/2)	15

Kurutulmuş numune tartıldıktan sonra, No.200 elekten yıkanır. Yıkanan numune $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ 'lik etüvde kurutulur. Malzemenin %100'ünün geçtiği eleklerden başlamak üzere alt eleklerden ayrı ayrı elenir. Her elek üzerinde kalanlar kümülatif (toplu olarak) tartılır. Tartımlar elek analizi formuna geçilir. Rutubeti giderilmiş numune ağırlığı kullanılarak her

elek üzerinde kalan miktarların yüzdesi ve daha sonra % geçen miktarları hesaplanır. Deneyde kullanılan zaman ayarlı elek sallama cihazı ve deney elekleri Şekil 3.2’de gösterilmiştir (Orhan, 2012).



Şekil 3.2. (a) Elek sallama cihazı



(b) Deney elekleri (www.utest.com.tr)

3.1.3.2. Aşınma (Los Angeles) deneyi (EN 1097-2, AASHTO T 96, ASTM C131, ASTM C535)

Los Angeles deneyi kaba agregaların aşınma ve çarpma kuvvetlerine direncinin değerlendirilebilmesi için yaygın olarak kullanılan bir deneydir. Deneyde, belirli gradasyondaki kaba agrega numunesi, içinde toplam 6-12 adet çelik bilya bulunan tambur içerisine yerleştirilir. Deneyde dane büyüklüğü 10-14 mm arasında olan en az 15 kg’lık agrega numunesi içerisinden alınan 5000 ± 5 g’lık numune kullanılır. Tambur dakikada 30-33 devir yapacak şekilde döndürülür, yuvarlanma hareketi daneler arasında ve çelik bilyalar ile daneler arasında aşınmaya neden olur. Deney sonucunda, numune No.12 elekten geçirilir ve eleği geçen malzeme yüzdesi numunenin Los Angeles parçalanma değerinin bir ölçüsü olarak kabul edilir (Mallick ve Korchi, 2013; Papagiannakis ve Masad, 2008).

Los Angeles katsayısı (LA) aşağıdaki eşitlikten hesaplanır:

$$LA = \frac{5000 - m}{50} \quad (3.1)$$

Burada;

m: 1,6 mm'lik elek üzerinde kalan kısım, g'dır.

Sonuç en yakın tam sayıya yuvarlatılarak verilir. Bu deney agregaların aşınmaya karşı dirençlerinin (durabilitesinin) belirlenmesi amacıyla yapılır. Kaplamalarda kullanılacak agregalar kompaksiyon sırasında ve trafik yükleri altında kırılmaya ve aşınmaya karşı dirençli olmalıdır. Aksi takdirde, ince malzeme miktarı artarak gradasyonun bozulması neticesinde dren kabiliyeti ve don dayanımının azalması gibi problemler ortaya çıkacaktır. Agreganın sınıflandırılması ve kullanım yerine bağlı olarak deney sınır değerleri %30 ile %50 arasında değişebilir. Los Angeles deney aleti ve deneyde kullanılan çelik bilyalar Şekil 3.3' de gösterilmiştir (Tunç, 2007; Speight,2015).



Şekil 3.3. (a) Los Angeles deney aleti (b) Kullanılan çelik bilyalar (www.utest.com.tr)

Alternatif dar dane büyüklüğü aralığı sınıflarını elde etmek için, Çizelge 3.2' de gösterilen uygun göz açıklıklı elekler kullanılır.

Çizelge 3.2. Alternatif dar aralık sınıfları (EN 1097-2)

Aralık sınıfları	Bilyaların sayısı	Bilya yükü kütlesi
mm		g
4 - 8	8	3410 - 3540
6,3 - 10	9	3840 - 3980
8 - 12	10	4260 - 4420
11,2 - 16	12	5120 - 5300

3.1.3.3. Mikro-deval (Aşınma kaybı) deneyi (EN 1097-1, AASHTO T 237, ASTM D7428)

Deney Deval isminde Fransız bir mühendis tarafından geliştirilmiş olup, Los Angeles aşınma deneyine benzerdir. Agregaların aşınma direncini belirlemek amacıyla yapılır. Aşındırma için Los Angeles deneyinde olduğu gibi bilyalar kullanılır. Ancak burada kullanılan bilyeler daha küçük boyutlu ve sayısı daha fazladır. Ayrıca numuneler yaş olarak deneye tabi tutulmaktadır. Kaba agreganın fiziksel ve mekanik özellikleri Çizelge 3.3’ de verilmiştir.

Deneyde 14 mm’lik eleği geçen ve 10 mm’lik elek üzerinde kalan malzeme kullanılır. Los Angeles deneyi ile temel farklılıklar;

- Kullanılan agrega miktarı daha azdır.(500±2 g)
- Tambur daha küçüktür. (200±1 mm içsel çap)
- Dönme süresi daha uzundur (2 saat-12 000 devir)
- Dönüş hızı daha yüksektir. (100 dev/dak)
- Tambura 2,5±0,05 litre su ilave edilir. Deney bitiminde agregalar kurutulur ve 1,6 mm’lik elekten geçirilir (Woodside, 1998; Nikolaides, A., 2015).

Çizelge 3.3. Kaba agreganın fiziksel ve mekanik özellikleri (Karayolu Teknik Şartnamesi, 2013)

Deney	Şartname limitleri		Deney standardı
	Binder	Aşınma	
Parçalanma Direnci (Los Angeles), % kayıp	≤ 30 (LA ₃₀)	≤ 27 (LA ₂₇)	TS EN 1097-2 AASHTO T96
Aşınma Direnci (Mikro-Deval), % kayıp	≤ 25 (M _{DE} 25)	≤ 20 (M _{DE} 20)	TS EN 1097-1
Hava Tesirlerine Karşı Dayanıklılık, (MgSO ₄ ile kayıp), %	18 (MS ₁₈)	16 (MS ₁₆)	TS EN 1367-2
Kırılmışlık, ağırlıkça %	≥ 95 - ≤ 0 (C _{95/0})	≥ 95 - ≤ 0 (C _{95/0})	TS EN 933-5
Yassılık İndeksi, %	≤ 30	≤ 25	BS 812
	≤ 25 (FI ₂₅)	≤ 20 (FI ₂₀)	TS EN 933-3
Cilalanma Değeri, %	≥ 35 (PSV ₃₅)	≥ 50 (PSV ₅₀)	TS EN 1097-8
Su emme, %	$\leq 2,5$ (WA ₂₄ 2,5)	$\leq 2,0$ (WA ₂₄ 2,0)	TS EN 1097-6
Soyulma Mukavemeti, % Bitümle Kaplı Yüzey	≥ 60	≥ 60	TS EN 12697-11
Kil Topakları ve Ufalanabilir Daneler,%	$\leq 0,3$	$\leq 0,3$	ASTM C142 AASHTO T 112

LA₃₀: Los Angeles aşınma değeri 30'dan düşük olan agrega

M_{DE} 25: Mikro-deval aşınma değeri 25'den düşük olan agrega

MS₁₈: MgSO₄ deneyi neticesinde kütle kaybı %18'den az olan agrega

FI₂₅: Yassılık indeksi %25'den az olan agrega

PSV₃₅: Agrega cilalanma değeri en az 35 olan agrega

WA₂₄ 2,5: 24 saat sonrasında su absorpsiyonu %2,5'den az olan agrega

3.1.3.4. İri agrega özgül ağırlık ve su emme deneyi (EN 1097-6, AASHTO T 85, ASTM C127)

Bu deney iri agregaların (4,75 mm elek üzerinde kalan agregaların) özgül ağırlık ve su emme oranını tayin etmek amacıyla yapılır. Özgül ağırlık; agreganın birim hacimdeki ağırlığının, aynı hacimde ve 25° C'deki suyun ağırlığına oranıdır. Üç çeşit özgül ağırlık vardır; bunlar, Zahirî Özgül Ağırlık, Hacim Özgül Ağırlık ve Yüzey Kuru Suyu Doygun Özgül Ağırlık'tır (Karacasu, 2016).

Malzemeden en az 2 kg alınır ve iyice yıkanır. Numuneler 24 saat su içerisinde bekletildikten sonra, numunelerin etüvde kurutulmuş ağırlığı (M_k, gram), doymun yüzey kuru ağırlığı (M_{SSD}, gram) ve tel sepet yardımıyla sudaki ağırlığı (M_s, gram) tespit edilir

(Mallick ve Korchi, 2013). Kaba agreganın doymun yüzey kuru ağırlığının tayini Şekil 3.4’de gösterilmiştir.



Şekil 3.4. (a) İri agrega özgül ağırlık deney düzeneği (b) Doymun yüzey numune tartımı

M_k = Agrega kuru ağırlığı, (g)

M_{ssd} = Agreganın suya doymun yüzey kuru ağırlığı, (g)

M_s = Agreganın sudaki ağırlığı, (g)

SG_a = Zahiri özgül ağırlık, (g)

SG_b = Hacim özgül ağırlık, (g)

SG_{ssd} = Yüzey kuru suya doymun özgül ağırlık olmak üzere,

$$SG_a = \frac{M_k}{M_k - M_s} \quad (3.2)$$

$$SG_b = \frac{M_k}{M_{ssd} - M_s} \quad (3.3)$$

$$SG_{ssd} = \frac{M_{ssd}}{M_{ssd} - M_s} \quad (3.4)$$

olarak hesaplanabilir.

3.1.3.5. İnce agrega özgül ağırlık ve su emme deneyi (EN 1097-6, AASHTO T 84, ASTM C128)

Bu deney ince agregaların (4,75 mm ile 0,075 mm elekler arasında kalan agregaların) özgül ağırlık ve su emme oranını tayin etmek amacıyla yapılır. İnce

agregaların tel sepet ile sudaki tartımı mümkün olmadığından, ince agrega özgül ağırlık deneyi piknometre yardımıyla yapılır. Kaba agregalar için belirtilen üç çeşit özgül ağırlık tanımı ince agregalar için de geçerlidir (Karacasu, 2016).

Deney 4 mm eleği geçen ve 0,063 mm elek üzerinde kalan agrega daneleri üzerinde uygulanır. Önemli olan nokta deneyde kullanılacak agrega miktarının 1 kg'dan az olmamasıdır (Nikolaides, A., 2015).

Deneyde, yıkanmış ve kurutulmuş ince malzemeden yeterli miktarda numune alınarak piknometreye konulur ve piknometre ile birlikte tartılır. Daha sonra piknometre yarısına kadar damıtılmış su ile doldurularak 24 saat bekletilir. Bu süre sonunda piknometre 15-30 dakika vakuma bağlanarak havası emilir. Vakum sonrası numunenin iyice çökmesi beklenir, üst kısımda tamamen berrak su oluşunca, piknometre taşınca kadar damıtılmış suyla doldurulur. Kapağı hava kabarcığı kalmayacak şekilde kapatılır ve 25°C'de 1-1,5 saat bekletilir. Piknometre iyice kurulanarak 0,1 g hassasiyetli terazide tartılır. Deney iki numune üzerinde yapılır ve sonuç olarak iki deneyin ortalaması alınır (İSFALT, 2001).

İnce agrega ve fillerin özgül ağırlığının piknometre ile tayini esnasında su içerisinde bekletilme aşaması Şekil 3.5' de gösterilmiştir.



Şekil 3.5. (a) İnce agrega numunesi suda bekletilmesi (b) Piknometre ile tartım

- A = Piknometre ağırlığı, (g)
 B = Piknometre+su ağırlığı, (g)
 C = Piknometre+yüzey kuru-suya doymun numune ağırlığı, (g)
 D = Piknometre+yüzey kuru-suya doymun numune ağırlığı+ su ağırlığı, (g)
 E = Kuru numune ağırlığı olmak üzere, (g)

$$SG_a = \frac{E}{(B - D) + E} \quad (3.5)$$

$$SG_b = \frac{E}{(B - A) - (D - C)} \quad (3.6)$$

$$SG_{ssd} = \frac{(C - A)}{(B - A) - (D - C)} \quad (3.7)$$

olarak hesaplanabilir.

3.1.3.6. Filler agregata özgül ağırlık deneyi (EN 1097-7, AASHTO T 84, ASTM C128)

Filler agreganın yoğunluğunun tayini piknometre metodu ile yapılır. Kullanılan piknometreler kaba ve ince agregalar için kullanılanlardan küçüktür. Piknometre kapasitesi genellikle 50 ml'dir.

EN 1097-7'ye göre; 10±1 g kadar küçük bir miktar kuru filler uygun bir sıvı ile 50 ml'lik piknometreye yerleştirilir. Su, denatüre etanol, yeniden damıtılmış kerosen veya toluen pek çok çeşit filler için uygun olmaktadır. Deney filler agregaların (0,075 mm elekten geçen agregaların) özgül ağırlığını tayin etmek amacıyla yapılır. Filler agregalar için sadece zahiri (görünen) özgül ağırlık hesaplanır (Nikolaides, A., 2015; Karacasu, 2016).

- A = Piknometre ağırlığı, (g)
 B = Piknometre+su ağırlığı, (g)
 C = Piknometre+numune ağırlığı, (g)
 D = Piknometre+numune ağırlığı+su ağırlığı, (g)
 E = Kuru numune ağırlığı olmak üzere,

$$SG_a = \frac{E}{(B - A) + (D - C)} \quad (3.8)$$

olarak hesaplanabilir.

3.1.3.7. Agrega birim hacim ağırlık deneyi (TS 3529, AASHTO T 19, ASTM C29)

Deney, agregaların sıkı ve gevşek durumlarındaki birim ağırlıklarının hesaplanması amacıyla yapılır. Agregada içerisindeki en büyük dane çapına göre kullanılacak numune miktarı değişmektedir (Asfalt ve Uygulamaları, 2001).

3.1.3.8. Yassılık indeksi deneyi (EN 933-3, ASTM D4791)

Yassılık indeksi deneyi ile yassı danelerin, deneyde kullanılan agregada ağırlığına oranı belirlenmektedir. Deney, en küçük boyutu en büyük nominal boyutunun 0,6' sından daha küçük olan agregada danelerinin yassı olarak sınıflandırılması esasına dayanmaktadır. İki elek arasında kalan danelerin nominal boyutu, bu iki elek açıklığının aritmetik ortalamasıdır. Dane boyutu ise, seçilen iki eleğin büyüğünden geçen ve küçüğünde kalan agregada boyutudur. Deney 80 mm elek üzerinde kalan ve 4 mm eleği geçen numunelere uygulanmaz (Nikolaides, A., 2015).

Asfalt betonunda kullanılan agregalar için gerekli sınır değerleri Çizelge 3.4' de verilmiştir.

Çizelge 3.4. Asfalt betonunda kullanılan agregalar için sınır şartları (Speight, 2015)

Standart	Deney	Gereklilik
AASHTO T 176	Kum eşdeğer	Minimum %45
AASHTO T 96	Los Angeles aşınma	Maksimum %30
AASHTO T182	Soyulma	> %95
ASTM D4791	Yassı ve uzun taneler	Maksimum %25
AASHTO T 11	Gradasyon	İşe göre karışım tasarımı
AASHTO T 104	Don dayanımı	9%
AASHTO T 84	Su emme	Maksimum %5

Not: Gereklilikler ülke ve bölgeye göre farklılıklar gösterebilir.

3.1.3.9. Donma çözülme deneyi (EN 1367-1/2, AASHTO T 104, ASTM C88)

Bu deney agreganın tekrarlı olarak donma çözünme etkilerine maruz kaldığında nasıl davranacağını laboratuvar koşullarında tespiti için yapılır. Genellikle sıfırın altında sıcaklıklara sahip ülkelerde uygulanır. EN 1367-1 standardına göre 4-63 mm arasındaki agregalara uygulanır.

Deney aleti temininin zor olması halinde deneyin hızlandırılmış olarak çeşitli kimyasal maddeler (Na_2SO_4 , MgSO_4) kullanılarak gerçekleştirilmesi de mümkündür. Kuru agrega numunesi $20\pm 5^\circ\text{C}$ 'deki su banyosuna 24 saat süre ile konulur. Sonrasında deney numuneleri 10 defa -20°C 'de donma ve $20\pm 3^\circ\text{C}$ 'de çözünme işlemine tabi tutulur (Nikolaides, A., 2015).

3.1.3.10. Agregada organik madde tayini deneyi (EN 1744-1, AASHTO T 112 ve 113, ASTM C123 ve C142)

Bu deney agregaların içinde organik madde bulunup bulunmadığını, varsa oranını belirlemek üzere yapılır. Renklendirme metodu adı verilen yöntem kullanılmaktadır. Agregalar hayvansal ve bitkisel atıkların çürümesi sonucu oluşan organik maddeler içerebilir. Sodyum hidroksit (NaOH) çözeltisi içerisinde agrega numunesinin çalkalanması sonucu meydana gelen renk değişimi ile organik madde içeriği belirlenebilir (Papagiannakis ve Masad, 2008).

AASHTO T 112 (ASTM C142) “Agregadaki Kil Topakları ve Ufalanabilir Taneler” deneyinde, yıkanan agrega kurutulur ve içerisindeki 0,075 mm’lik elekten geçen malzemenin ayrılması için eleme işlemine tabii tutulur. Sonrasında numune 24 saat süre ile su banyosunda bekletilir. Bu süre sonunda numune ıslak olarak eleme işlemine tabii tutulur. Bu esnada kırılabilir ve ufalanabilir taneler el ile ufalanır. Bu şekilde ayrıştırılabilen taneler, kil topağı veya ufalanabilir taneler olarak değerlendirilir. Üst sınır olarak, ağırlıkça deneye tabi tutulan malzemenin %1’ini geçmemesi arzu edilir (Mallick ve Korchi, 2013).

3.1.3.11. Agregaların cilalanma deneyi (EN 1097-8, AASHTO T 278 ve 279, ASTM E303, ASTM D3319)

Bu deney agregaların trafik yükleri etkisi altında aşınmaya karşı direncini ölçmek amacıyla yapılır. İsteğe bağlı yapılan bir deneydir. Eğer patinaja karşı aşınma değerinin %60 'tan büyük olması isteniyorsa bu deney yapılır. Bazalt, granit vb. gibi sert ve yüzeyi pürüzlü agregalarda cilalanma değeri yüksektir. Kalker kökenli çok sert olmayan agregalarda ise cilalanma değeri düşüktür. Cilalanma deneyi; agregaların cilalanması ve sürtünme aletinde cilalanma değerinin tespiti olmak üzere iki aşamadan oluşur.

Avrupa ve Amerikan standartları arasındaki önemli farklılıklar; kullanılan agreganın nominal boyutu, deney tekerleklerinin tip ve sayısı, agregaların cilalanmaya maruz bırakılma şekli ve PSV (Agrega cilalanma değeri) indeksini hesaplama yoludur.

Avrupa standardında 10 mm'lik eleği geçen ve 7,2 mm'lik elek üzerinde kalan malzeme kullanılır ve iki tekerlek vardır. Amerikan standardına göre 12,5 mm'lik eleği geçen ve 9,5 mm'lik elek üzerinde kalan malzeme kullanılır, tekerlek sayısı birdir (Nikolaides, A., 2015).

$$PSV = S + 52,5 - C \quad (3.9) \text{ olarak hesaplanabilir (Woodside, 1998).}$$

Burada; S: Dört deney numunesinin ortalaması

C: Dört kontrol numunesinin ortalaması'dır.

PSV değeri 68'i geçen agregalar cilalanma değeri yüksek, 50'den düşük ise cilalanma değeri düşük agregalar olarak kabul edilir (Woodside, 1998).

3.1.3.12. Su etkilerine karşı dayanıklılık (Soyulma) deneyi (Nicholson yöntemi) (EN 12697-11, AASHTO T 182, ASTM D1664)

Suyun etkisi ile bitüm film tabakası agregadan soyuluyorsa karışımın adezyonu ve stabilitesi azalır. Bu nedenle, agregaların soyulmaya karşı dirençleri bu deneyle tespit edilir.

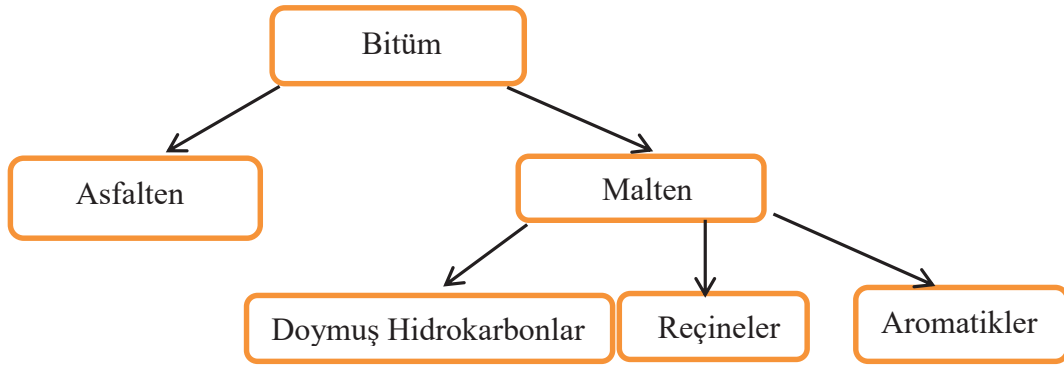
Deneyde, kırılmış agrega numunesinin 9,5-4,75 mm ya da 4,75-3,35 mm'lik elekler arasında kalan kısmından yaklaşık 200 g alınarak iyice yıkanır ve 110°C'lik etüvde kurutulur. Yıkanmış, kurumuş agregadan $30 \pm 0,5$ g alınarak 1 saat 110°C'lik etüvde bekletilir. Öte yandan $1,5 \pm 0,1$ g bitüm, 250 cm³ beher içinde 110°C'lik kum banyosuna konularak ısıtılır. Bitüm eriyince, etüvde ısıtılmış agrega behere dökülür ve cam bir bagetle bütün agrega danelerinin üzeri üniform bir bitüm filmiyle kaplanıncaya kadar kum banyosu üzerinde karıştırılır.

Daha sonra bitümlü agrega 24 saat 60°C'lik etüvde tutulur. Bu sürenin sonunda beher etüvden çıkarılıp, kum banyosunda hafifçe ısıtıldıktan sonra 10 cm çapında petri kabına aktarılır. Bitümle kaplı agregaların üzeri bagetle çok hafif darbelerle düzeltilir. 10 dakika laboratuvar sıcaklığında bekletilir, sonra petri kabı suyla doldurulur ve üzeri cam bir kapakla kapatılarak yeniden 24 saat bekletilmek üzere 60°C'lik etüve konulur. Süre sonunda petri kabı dışarıya alınarak suyu değiştirilir. Yandan gelen bir ışık altında karışımın özellikle üst yüzü gözle incelenir. Deney sonunda soyulmamış sathın bütün satha oranı, soyulmaya karşı dayanıklılık olarak verilir (İSFALT, 2001; Karacasu 2016).

3.2. Bitüm

Bitüm, asfaltenler ve maltenler olarak iki geniş kimyasal gruba ayrılır. Bitüm, asfaltenlerin maltenler içerisinde çözünmüş veya dağılmış bir süspansiyon sistemi olarak tanımlanabilir. Asfaltenler bitümün %5-25'ini oluşturmakta ve miktarı bitümün reolojik özellikleri üzerinde önemli etkilere sahiptir. Asfalten miktarının artırılması ile daha düşük penetrasyon ve daha yüksek yumuşama noktasına sahip, daha sert ve yüksek viskoziteli bir bitüm elde edilmektedir. Maltenler; doymuş hidrokarbonlar, aromatikler ve reçineler olarak alt gruplara ayrılır. Aromatikler bitümün %40-65'ini oluştururlar. Bitümün kimyasal yapısı Şekil 3.6' da gösterilmiştir.

Bitüm, reolojik özellikleri büyük ölçüde elde edildiği ham petrolün türüne bağlı, daha az oranda ise işlenme şekline bağlı olan viskoelastik bir malzemedir. BSK'larda kohezyon bitüm tarafından sağlanırken, agrega ise karışımın içsel sürtünme direncinden ve stabilitesinden sorumludur.



Şekil 3.6. Bitümün kimyasal yapısı

Dünya genelinde yılda yaklaşık 102 milyon ton bitüm kullanılmakta olup, üretilen bitümün %85'i yol ve diğer kaplamalı saha inşaatlarında kullanılmaktadır. Üretilen bitümün %10'u çatı kaplamalarında, %5'i ise sızdırmazlık ve yalıtım amaçlı olarak (Boru kaplamaları, derz dolgu malzemeleri, boyalar, vb.) kullanılmaktadır (Speight, 2016; Hunter vd., 2015).

BSK'ların performansı; tasarım, asfalt betonunu oluşturan bileşenlerin kalitesi gibi pek çok faktöre bağlıdır. Bitüm hacimsel anlamda asfalt betonun nisbeten küçük bir bileşenidir ancak asfalt betonun dayanıklılığı ve viskoelastik özellikleri üzerinde çok önemli bir role sahiptir.

Bitümün; reoloji, kohezyon, adezyon ve dayanıklılık gibi dört özelliği kontrol edilebildiği takdirde istenilen performansı elde etmek mümkündür (Hunter vd., 2015).

3.2.1. Bitümlerin sınıflandırılması

Üstyapı uygulamalarında kullanılan bitümler kimyasal özelliklerinden ziyade fiziksel özelliklerine göre sınıflandırılırlar. Bitümleri sınıflandırmak ve derecelendirmek için günümüzde dört farklı sistem mevcuttur. Bunlar;

- Penetrasyon sınıflandırması, (ASTM D946, EN 12591)
- Viskozite sınıflandırması, (ASTM D3381)
- Yaşlandırılmış bitüm viskozite sınıflandırması, (ASTM D3381)

- Superpave performans sınıflandırması olarak sıralanabilir (Papagiannakis ve Masad, 2008; Lavin, 2003).

Bitümlerin penetrasyon sınıflandırması en eski ve halen kullanılan sınıflandırma yöntemidir. Penetrasyon deneyi, standart uçlu iğnenin, belirli bir yük altında, belirli bir süre ile 25°C sıcaklıkta düşey doğrultuda bitüm numunesine batma miktarının belirlenerek, bitüm kıvamlılığının tespit edilmesidir. Penetrasyon derecesi yükseldikçe daha yumuşak, daha akışkan bitüm söz konusudur (Karacasu, 2016).

Penetrasyon sınıfı bitümler penetrasyon ve yumuşama noktası deneylerine göre sınıflandırılır. Penetrasyon sınıflandırmasında, 40/50, 60/70, 85/100, 120/150 ve 200/300 olmak üzere beş farklı bitüm sınıfı vardır. Örneğin; 40/60 penetrasyon bitümün 40 ile 60 arasında (60 dahil) penetrasyon değeri vardır. Penetrasyon birimi desimilimetre (0,1 mm)'dir Bu sistemde bitüm yaşlandırılmadan deney tabi tutulmaktadır (Hunter vd., 2015).

Penetrasyon sınıflandırmasında EN 12591'de belirtilen geleneksel deney metodları uygulanır. Modifiye bitümlerin performansının tespiti için daha detaylı deney metodları gerekmektedir.

Viskozite sıvıların akmaya karşı gösterdiği direncin bir ölçüsüdür. Kesme gerilmesinin deformasyon hızına oranı olarak tanımlanır. Uygulanan kesme gerilmesinin kesme şekil değişimine oranı olarak tanımlanır. Uluslararası Birimler Sistemi (SI)'nde viskozite birimi (Pa.s) 'dir. Bitüm dahil olmak üzere bütün basit sıvıların viskozitesi artan sıcaklık ile azalır.

Newton, sıvıları akış özelliklerine göre iki sınıfa ayırmıştır:

- Newtonian davranış gösterenler,
- Newtonian olmayan davranış gösterenler.

Bazı akışkanlarda kesme gerilmesi ile kesme hızı doğrusal orantılı olup, viskozite sabittir. Kesme hızının değişmesi ile viskozite değişmemektedir. Bu tip sıvılar Newtonian (ideal akışkan) sıvılar olarak adlandırılır. Newtonian olmayan akışkanlarda, viskozite

değeri kesme hızına bağlı olarak değişmekte, yani hızlı yükleme ve yavaş yükleme şartları için farklı viskozite elde edilmektedir (Güngör ve Sağlık, 2009).

Standart rafine bitümler için, ABD’de ve diğer bölgelerde bitümün viskoziteye göre sınıflandırma sistemi; 60°C’ye yakın veya aşan sıcaklıklarda ve çok düşük kesme oranlarında bitümün newtonian davranış gösterme eğiliminde olacağı esasına dayanır. Yeteri kadar yüksek kesme oranlarında, bütün sıvılar newtonian olmayan davranış gösterir (Hunter vd., 2015).

Viskozite sınıflandırma sisteminde bitümün 140°F (60°C)’deki mutlak viskozitesi esas alınır. Bu sistemde; AC-2,5; AC-5; AC-10; AC-20; AC-30 ve AC-40 olmak üzere beş farklı bitüm sınıfı mevcuttur. AC kısaltması bitüm yerine kullanılırken, yanındaki nümerik değer 60°C’deki viskozitenin yüzde birinin “poise” olarak değeridir. Örneğin; AC-5 60°C’de mutlak viskozitesi 500 poise, AC-40 ise 60°C’de viskozitesi 4000 poise olan bitüm demektir. Viskozite yaşlandırılmamış bitüm için ölçülür (Papagiannakis ve Masad, 2008).

Dinamik (mutlak) viskozite belirli bir hacimdeki bitümün vakum altında, belirli bir sıcaklıkta kapiler bir tüp içerisinden boşalması için geçen süredir. Sıvı bitümün viskozluğu azaldıkça, akmaya karşı gösterdiği direnç daha az olacağından, boşalma süresi de azalacaktır. Dinamik viskozitenin birimi Poise (g/cm.s) olup, 1 Poise 0,1 Pa.s (Paskal.saniye)’ye eşittir.

Bitüm genellikle 60°C ve 135°C olmak üzere iki farklı sıcaklık esas alınarak sınıflandırılır. 60°C asfalt beton kaplama yüzeyindeki maksimum sıcaklığa yakın olduğu için, 135°C ise BSK’ların karıştırma ve serim sıcaklığına yakın olduğu için seçilmektedir (Lavin, 2003).

Bitümün 135°C’deki kinematik viskozitesi pompalama ve işleme özelliklerinin tespitini sağlamaktadır. ASTM D2140 standardı 135°C’deki kinematik viskozitenin tayininde kullanılmaktadır.

Bir akışkanın dinamik viskozitesinin, akışkanın özkütlesine oranı kinematik viskoziteyi vermektedir. Kinematik viskozite, belirli hacimdeki bir bitümün belli bir ısıda, kalibre edilmiş kılcal bir cam borudan akarak geçmesi için geçen süre olup, saniye cinsinden ölçülen bu sürenin viskozimetre cihazının kalibrasyon sabiti ile çarpılması suretiyle santistoke, cSt, birimi (1 stoke=100 mm²/s) cinsinden ifade edilmektedir (Tunç, 2007).

p: mutlak viskozite, d: yoğunluk (g/cm³) olmak üzere, kinematik viskozite (μ) aşağıdaki bağıntı ile hesaplanabilir:

$$\mu = \frac{p}{d} \quad (3.10)$$

EN 12591 daha sert penetrasyon sınıflarının yanı sıra yumuşak bitümleri de kapsamaktadır. Ancak, penetrasyon ve yumuşama noktası deneyleri yumuşak bitümlere uygulanmadığından, 135°C'deki viskozite ölçümü bitüm sınıfının tespitinde kullanılmaktadır. Bu sınıflandırma viskozite sınıflandırması olarak adlandırılır ve tarifi Çizelge 3.5'de özetlenmiştir. V3000 bitümün 60°C'deki nominal kinematik viskozitesi 3000 mm²/s'dir (Ekblad ve Lundström, 2017).

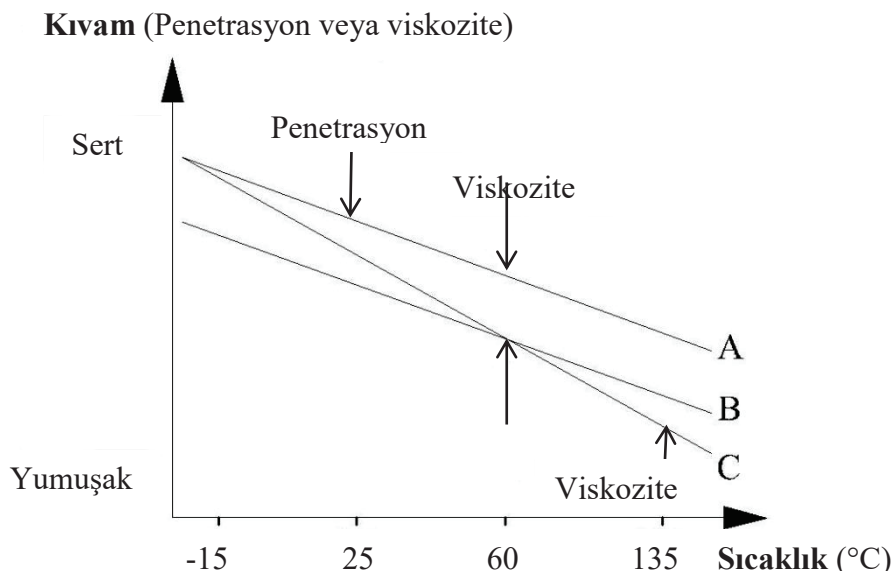
Çizelge 3.5. Yumuşak bitümlerin viskozite sınıflandırması özellikleri (Hunter vd., 2015).

Özellik	Standart	Biri m	V1500	V3000	V6000	V12000
60°C'deki Kinematik Viskozite	EN 12595	mm ² / s	1000- 2000	2000- 4000	4000- 8000	8000- 16000
120°C'de Sertleşmeye Direnç Kütle Değişimi	EN 12595	%	≤ 2,0	≤ 1,7	≤ 1,4	≤ 1,0
Parlama Noktası	EN ISO 2719	°C	≥ 160	≥ 160	≥ 180	≥ 180
Çözünürlük	EN 12592	%	≥ 99,0	≥ 99,0	≥ 99,0	≥ 99,0
120°C'de Sertleşmeye Direnç (TFOT) 60°C'de Viskozitelerin Oranı	EN 12607-2		≤ 3,0	≤ 3,0	≤ 2,5	≤ 2,0

Superpave deneylerinden olan, dönel viskozimetre deneyi; inşaat koşullarını temsil edecek şekilde 135°C sıcaklıkta bitüm viskozitesinin tayininde kullanılmaktadır. Bitümün

BSK'da kullanımı için uygun işlenebilirlikte olması açısından, viskozite değeri 3 Pa.s'den az olmamalıdır.

Geleneksel şartnameler, farklı bitümleri, farklı sıcaklık ve performans özelliklerine sahip olsalar bile aynıymış gibi sınıflandırabilmektedir. Şekil 3.7' de 60°C'de tanımlanmış viskozite limitleri arasında olan, 25°C'de minimum penetrasyona sahip ve 135°C'de minimum viskoziteye ulaşan aynı viskozite sınıfına sahip üç farklı bitüm görülmektedir.



Şekil 3.7. Aynı viskozite sınıfında üç farklı bitüm (McGennis vd., 1995; Loh ve Olek, 1999; Tam, 2006; FHWA,1997; Asphalt Institute, 2007).

Değişen sıcaklık şartları altında, A ve B bitümlerinin sıcaklıkla değişen kıvam özellikleri benzer bir farklılık gösterirken, C bitümünün düşük ve yüksek sıcaklık davranışının daha farklı olduğu ve A ve B bitümlerine oranla daha hızlı yumuşama gösterdiği görülmektedir. Düşük sıcaklıklarda aynı kıvama sahip olan A ve C bitümleri yüksek sıcaklıklarda çok farklı kıvamlara sahip olmaktadır. 60°C sıcaklıkta aynı kıvama sahip olan B ve C bitümlerinin kıvamları, farklı sıcaklıklarda birbirlerinden önemli ölçüde farklılıklar göstermektedir. C bitümü 60°C'den daha düşük sıcaklıklarda B'den daha sert iken, yüksek sıcaklıklarda daha yumuşak hale gelmektedir. Dolayısıyla bu üç bitüm, kaplamanın hizmet vereceği bölgedeki farklı sıcak ve soğuk iklim koşullarında farklı performanslar sergileyecektir. Standart sıcaklıklarda aynı penetrasyona veya viskoziteye sahip birçok bitüm farklı sıcaklıklarda farklı davranışlar gösterebilir. Aynı penetrasyona sahip oldukları için farklı bitümler aynıymış gibi sınıflandırılabilirler ve bu bitümlerin her

şartta aynı performansı göstereceği hatasına düşülebilmektedir (Loh ve Olek, 1999; Tam, 2006).

Yaşlandırılmış bitüm viskozite sınıflandırma sistemi; İnce Film Etüvü Deneyi (TFOT) ile yaşlandırma sonrası bitüm viskozitesinin ölçümüne dayanmaktadır. Mutlak viskozite 140°F (60°C) sıcaklıkta “poise” olarak ölçülür. AR-1000, AR-2000, AR-4000, AR-8000 ve AR-16000 olmak üzere beş sınıf mevcuttur. AR (Asphalt residue) kısaltması yaşlandırılmış bitüm yerine kullanılmaktadır. Sınıflandırmada kullanılan rakamlar poise olarak mutlak viskoziteyi ifade etmektedir. AASHTO M 226 ve ASTM D3381’e göre bitüm viskozite sınıflandırması Çizelge 3.6’da gösterilmiştir (Papagiannakis ve Masad, 2008).

Çizelge 3.6. AASHTO M 226 ve ASTM D3381’e göre bitüm viskozite sınıflandırması

Standart	Orijinal Bitüm (AC) Sınıflandırması						Yaşlandırılmış Bitüm (AR) Sınıflandırması				
AASHTO M 226	AC-2,5	AC-5	AC-10	AC-20	AC-30	AC-40	AR-10	AR-20	AR-40	AR-80	AR-160
ASTM D3381	AC-2,5	AC-5	AC-10	AC-20	AC-30	AC-40	AR-1000	AR-2000	AR-4000	AR-8000	AR-16000

Superpave performans sınıflandırma sistemi, bitüm sınıflandırmasında yaygın olarak kullanılan sistemdir. Bu sistem 1987’de ABD Ulaşım Departmanı tarafından Stratejik Karayolu Araştırma Programı çerçevesinde (SHRP) hazırlanan performans derecelendirmeli bitüm şartnamesi ile oluşturulmuştur. Diğer üç sisteme göre pek çok avantajı mevcuttur.

Yükleme oranının bitüm özelliklerine etkilerini dikkate alacak şekilde geliştirilmiştir. Deneyler, bitümün kullanılacağı coğrafik konumu temsil eden sıcaklıklarda gerçekleştirilmektedir. Penetrasyon ve viskozite sınıflandırma sistemleri; inşaat sahasındaki sıcaklığı temsil etmeyen, sabit sıcaklıklarda gerçekleştirilen deneyleri esas almaktadır (Papagiannakis ve Masad, 2008).

Superpave bitüm şartnamesinde bitümler, hizmet vereceği bölgenin sıcaklık koşullarında gösterdikleri performansa dayalı olarak sınıflandırılmıştır. Bu nedenle bu tür

bitümlere “performans sınıfı” (Performance grade) adı verilmiş ve PG simgesi ile tanımlanmıştır.

Dinamik kesme reometresi 10 rad/s açısal hız ile bitüm viskoelastik özelliklerinin (G^* , δ) ölçülmesinde kullanılmaktadır. Bitümün düşük sıcaklık çatlaklarına direnci BBR ve DTT kullanılarak değerlendirilmektedir.

3.2.2. Bitümün reolojik özellikleri

Reoloji, malzemelerin deformasyon karakteristiklerini yalnızca yüke bağlı olarak değil hem yüke hem de yükleme süresine bağlı olarak inceler. Bitüm reolojik bir malzeme olduğundan gerilme-deformasyon ilişkileri hem yükün miktarı hem de yükün tatbik süresine bağlıdır. Mühendislikte kullanılan malzemeler gerilme-deformasyon ilişkisi yönünden üç gruba ayrılır. Bunlar; elastik malzemeler, viskoz malzemeler ve viskoelastik malzemelerdir (Tunç, 2007).

Elastik malzemeler gerilmeye tabi tutulduklarında yükün miktarı ile doğru orantılı olarak deformasyon miktarları artar ve uygulanan gerilme kalktığında deformasyon da ortadan kalkar.

Deforme olmuş bir malzemenin, deformasyona neden olan kuvvet ortadan kaldırıldıktan sonra orijinal şekil ve boyutuna geri dönme kabiliyetine elastisite denir ve bu davranışı gösteren malzemeler elastik olarak adlandırılır. Katı malzemelerin çoğunluğu elastisite gösterir ve nisbeten küçük gerilmelere tepki olarak orantılı bir şekil değişimi oluşur (Hunter vd. 2015).

Viskoz malzemelerde; gerilme uygulandığında deformasyon başlar ve gerilme tatbik edildiği sürece deformasyon yükün uygulanma süresine bağlı olarak artar. Gerilme ne kadar büyükse deformasyonda o kadar büyük olur. Elastik malzemelerin aksine gerilme kalktığında deformasyon kalkmaz. Yani deformasyon kalıcı deformasyon olup, geçici deformasyon oluşmaz (Tunç, 2007).

Deforme olmuş malzeme üzerindeki yük kaldırıldığında, malzeme orijinal uzunluğuna geri dönmüyor ise, plastik davranış gösteriyor demektir (Hunter vd. 2015).

Viskoelastik malzemeler ne tam elastik ne de tam viskoz davranış gösterirler. Hızlı yüklendiklerinde elastik davranış gösterirlerken, yavaş yüklendiklerinde ise viskoz davranış gösterirler. Yükleme hızının ne hızlı ne de yavaş olduğunda ise viskoz ve elastik davranışların birleşimi şeklinde davranırlar. Bu nedenle bu tip malzemelere viskoelastik malzemeler denir.

Bütün bitümler termoplastiktir; yani sıcaklık azaldıkça sertleşirler (daha viskoz), sıcaklık yükseldiğinde ise yumuşarlar (daha az viskoz). Bu özellik sıcaklık duyarlılığı olarak isimlendirilir ve bitümün en değerli niteliklerinden biridir. Bitümün sıcaklık duyarlılığının olması önemlidir, çünkü yüksek sıcaklıklarda karıştırma esnasında agreg danelerinin bitümle kaplanmasına imkân verecek ölçüde akışkan olmalıdır. Normal hava sıcaklıklarında ise, kaplama içerisindeki agreg danelerini yerinde tutması açısından bitüm yeteri kadar viskoz olmalıdır (Speight, 2016).

Reoloji disiplininin merkezindeki kavram deformasyon ve akmadır. Deformasyon katı davranış ile ilişkili olup, uygulanan yüke tepki olarak şekil veya boyutlardaki değişim olarak tanımlanabilir. Akma, sıvılarla (ve gazlarla) ilişkili olup, yük uygulandığı süre boyunca devam eden bir deformasyondur (Hunter vd. 2015).

Bitüm; düşük sıcaklıklarda ve/veya kısa yükleme süreleri için cam benzeri elastik katılar gibi, yüksek sıcaklıklarda ve/veya yavaş yüklemelerde viskoz sıvılar gibi davranan termoplastik ve viskoelastik bir sıvıdır. Bitümün gerilmelere olan tepkisi hem sıcaklık hem de yükleme süresine bağlı olup, bitümün reolojisi onun gerilme/şekil değişimi/zaman/sıcaklık tepkisi ile tanımlanır (Hunter vd. 2015).

3.2.3. Viskoelastik davranış

Bitüm viskoelastik bir malzemedir. Bu; bitümün hem viskoz hem de elastik davranış gösterdiği anlamına gelmektedir. Bitümün viskoz veya elastik davranış göstermesi hem sıcaklık hem de yükleme hızına bağlıdır. Bitümün 60 °C sıcaklıkta bir

saatteki akma miktarı ile 25°C sıcaklıkta 10 saatteki akma miktarı aynıdır. Bitümlerin akma özelliklerinin ölçülmesinde zaman ve sıcaklık etkileri önemli faktörlerdir. Yüksek sıcaklıkta kısa yükleme sürelerinde bitümde oluşan akma ile düşük sıcaklıkta daha uzun yükleme sürelerinde oluşan akmanın birbirine denk olduğu söylenebilir. Bu faydalı görüş, zaman-sıcaklık süperpozisyonu olarak adlandırılır ve lineer viskoelastik malzemelere uygulanabilir (Asphalt Institute, 2007).

Viskoelastik terimi, sıcaklığa ve yükleme süresine bağlı olarak elastik katı veya viskoz sıvı gibi davranan malzemenin mekanik özelliklerini ifade eder. Viskoelastik malzemeler üzerinde uygulanan yük kaldırıldığında, zamana bağlı iyileşme gösterir ki, bu yönü ile visko-elastisite plastisiteden ayrılır. Bu durum gecikmiş elastik tepki olarak adlandırılır. Plastik bir malzeme üzerindeki yük kaldırıldıktan sonra orijinal şekline geri dönmez, plastisite metallerde duktilite olarak adlandırılır.

Bitümün viskoelastik davranışı ve genel olarak mekanik özelliklerinin bilinmesi mühendis açısından büyük önem taşımaktadır. Çoğu araştırmacı bitümün viskoelastik davranışını matematiksel denklemler ile açıklamaya çalışmıştır. Geliştirilen denklemler, elastik ve viskoz davranışı temsil eden iki unsurun kombinasyonuna dayanmaktadır. Bu unsurlar; yay ve piston'dur (Nikolaides, A., 2015).

3.2.4. Bitümün yüksek, düşük ve orta sıcaklık davranışı

Asfalt beton viskoelastiktir, yani sıcaklık ve yükleme hızına göre hem elastik hem de viskoz özellikler gösterir. Yüksek sıcaklıklarda yavaş yükleme koşullarında (ör; yavaş hareket eden trafik) bitüm viskoz sıvı gibi davranır ve akar. Bu durum sıklıkla plastik davranış olarak adlandırılır çünkü bitüm aktıktan sonra orijinal konumuna geri dönmez. Bu durum BSK'da kalıcı deformasyonlara yol açabilir. Yaz aylarında veya yavaş hareket eden ağır taşıtların yarattığı gibi devamlı yüke maruz kaldığında bitüm viskoz sıvı gibi davranır (Huber, 1999; Tam, 2006).

Kesme hızı değiştikçe, bitüm newton ya da newton olmayan davranış özellikleri gösterebilir. Newton akışkanlarında direnç kuvveti (kayma gerilmesi) ile nisbi hız (kayma gerilmesi oranı) arasında doğrusal bir ilişki vardır. Diğer bir deyişle, newton akışkanına iki

katı yük uygulanırsa, iki kat hızlı hareket edecektir. Hava, su ve sıcak bitüm (60 °C'den yüksek sıcaklıklarda) genel Newton akışkanlarıdır. Bu maddeler için, kesme hızı ne olursa olsun viskozite (μ) sabittir (Asphalt Institute, 2007).

Bitümler, özellikle modifiye bitümler newton olmayan davranış gösterebilirler. Bazı BSK'lar pseudoplastik veya "kayma incelten" davranış gösterebilir (Asphalt Institute, 2007).

Kış aylarında veya hızlı hareket eden kamyonların yarattığı gibi, hızlı uygulanan yüke maruz bırakıldığında bitüm elastik katı gibi davranır. Elastik katılar lastik bant gibidir; yüklendiğinde deforme olur, yük kaldırıldığında ise orjinal şekline geri döner. Malzeme kapasite veya dayanımının üzerinde gerilmeye maruz bırakıldığında elastik katılar kırılabilir. Bitüm düşük sıcaklıklarda elastik katı olmasına rağmen, yüklendiğinde çok kırılgan olabilir ve çatlaklar oluşabilir. Bu nedenle; asfalt beton üstyapılarda soğuk havalarda zaman zaman düşük sıcaklık çatlakları görülebilmektedir. Bu tür durumlarda bozulmaların nedeni, düşük sıcaklıklar sonucunda asfalt beton üstyapıda biriken içsel gerilmelerdir.

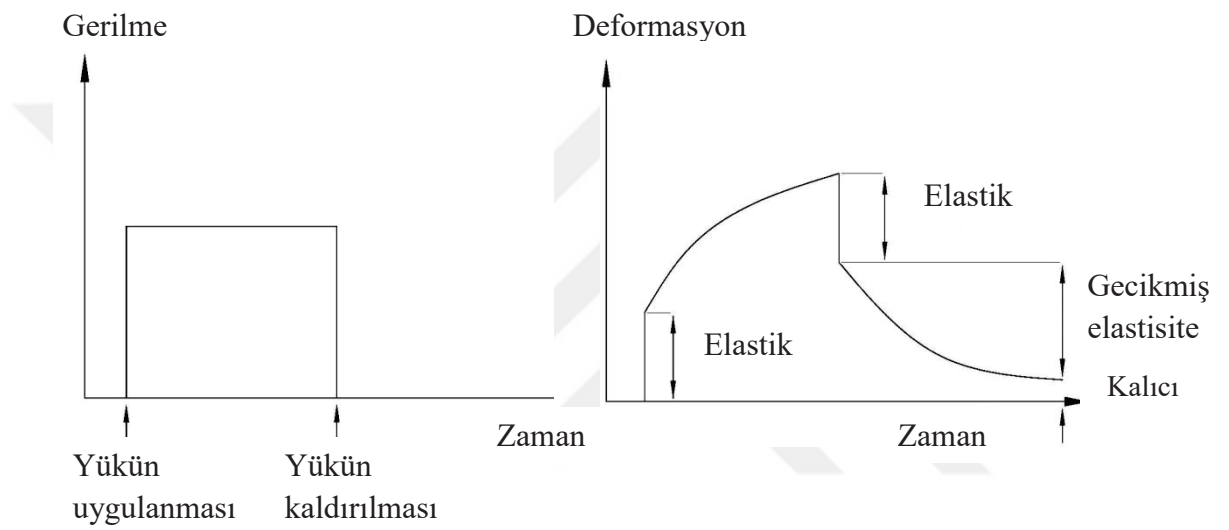
Sıcaklık azaldıkça, agregaları yapıştıran bitüm büzülür. Eğer bitümdeki içsel gerilmeler bitümün dayanımını aşarsa, agregalar arasındaki arayüz kaybolur ve bu durum çatlak oluşumu ile neticelenir.

-10°C altındaki çok düşük sıcaklıklarda bitümler neredeyse elastik katılar gibi davranır; gerilme uygulandığında aniden deforme olur, gerilme kaldırıldığında aniden iyileşir. Ancak, bu düşük sıcaklıklarda düşük mekanik dayanımı nedeniyle bitüm çok dayanıksız durumdadır; uygulanan gerilme çok yüksek ise, çatlak oluşacaktır (Green, 1998).

İlkbahar veya sonbahar gibi orta sıcaklık aralıklarında, bitüm hem viskoz sıvı hem de elastik katı özellikler gösterir. Isıtıldığında bitüm yağ gibi davranır, agregaya ile karıştırılması kolaylaşır, agregayı sarar ve düzgün bir yüzey oluşturmak üzere serme ve sıkıştırma işlemi kolaylaşır. Soğuduktan sonra, agregaları katı matris halinde bir arada tutan yapıştırıcı (tutkal) gibi davranır (Huber, 1999).

Sünme deneyindeki viskoz ve elastik davranışın bu birleşimi Şekil 3.8’de gösterilmiştir. Belirli bir zaman dilimi için gerilmeye maruz bırakıldığında, bitüm gösterildiği şekilde deforme olacaktır. Bu deformasyon üç aşamadan oluşmaktadır:

- Ani elastik şekil değişimi (geri dönüşümlü),
- Gecikmiş elastik şekil değişimi (geri dönüşümlü),
- Kalıcı şekil değişimi (geri dönüşümsüz) veya viskoz akma (Green, 1998).



Şekil 3.8. Bitümün viskoelastik sünme davranışı (Green, 1998).

3.2.5. Bitüm deneyleri

Yol kaplamalarında kullanılacak bitümün sahip olduğu özellikleri ve bu özelliklerin teknik şartnamelerde istenilen sınırlar içerisinde olup olmadığını belirlemek için aşağıda açıklanan bitüm deneyleri gerçekleştirilir.

3.2.5.1. Penetrasyon deneyi (EN 1426, AASHTO T 49, ASTM D5)

Penetrasyon deneyi 19’uncu yüzyılda geliştirilmiş, yaygın olarak bilinen ve halen kullanılan bir deneydir. Standart uçlu iğnenin belirli bir yük altında, belirli bir süre ile 25°C sıcaklıkta düşey doğrultuda bitüm numunesine batma miktarının belirlenerek, bitümün kıvamlılığının tespit edilmesidir. Genellikle uygulanan yük 100 g, yükleme süresi 5 s’dir (Southern, M., 2015).

Deneydeki batma miktarı desimilimetre (1 dmm=0,1mm) olarak ifade edilir. İğne 20 mm battığı takdirde, penetrasyon değeri 200' dür. Penetrasyon değeri düştükçe bitüm sertleşir. Ekipmanla 2 dmm'den az ve 500 dmm'den büyük penetrasyon değerlerinin doğru olarak tespiti mümkün değildir. Yumuşak bitümler daha uzun iğneler gerektirir. Çok yumuşak bitümler sıklıkla viskoziteye göre sınıflandırılır (Garber ve Hoel, 2009; Hunter, vd. 2015; Tam 2006).

Deneyde numune yüzeyinde en az üç farklı noktada ölçüm yapılır ve bulunan değerlerin ortalaması alınır. EN 1426'ya göre, birbirini izleyen üç ölçüm için minimum ve maksimum değerler arasında; penetrasyon 0-49 dmm ise 2 dmm, 50-149 dmm ise 4 dmm, 150-249 dmm ise 6 dmm, ≥ 250 dmm ise 8 dmm den fazla fark olmamalıdır. ASTM D5'e göre izin verilebilecek farklar aynı bitüm sınıfları için 2, 4, 12 ve 20 dmm' dir (Nikolaides, A., 2015).

3.2.5.2. Yumuşama noktası deneyi (EN 1427, AASHTO T 53, ASTM D36)

Bitümün yüksek sıcaklıklardaki kıvamı halka ve bilya deneyi olarak da bilinen yumuşama noktası deneyi ile belirlenir. Penetrasyon deneyi ile birlikte yumuşama noktası deneyi de bitümlerin sınıflandırılmasında kullanılır. Viskoelastik bir malzeme olan bitümün belirli bir ergime noktası yoktur. Yavaş yavaş yumuşar ve sıcaklık arttıkça daha az viskoz hale gelir (Garber ve Hoel, 2009).

Deneyde su veya gliserin içeren cam beher içerisinde halka içerisindeki iki bitüm numunesi üzerine çelik bilye konulur. 80°C ve altında yumuşama noktası olan bitüm için su, 80°C üzerindeki yumuşama noktaları için ise gliserin kullanılır. Su kullanıldığında, deney başlangıç sıcaklığı 5°C olarak alınır ve deney sıcaklığı dakikada 5°C artacak şekilde ısıtıcı ayarlanır. (Gliserin için başlangıç sıcaklığı 30°C) Deney halkaları içindeki bitümün beher tabanına değdiği andaki sıcaklık değerleri okunur (Hunter, vd. 2015).

Halka ve bilye yumuşama noktası deneyi bitümün 30-150°C sıcaklık aralığındaki yumuşama noktasının tayini için yaygın olarak kullanılan bir metottur. Yumuşama noktası bitümün yüksek sıcaklık performansı hakkında bilgi vermektedir. Ancak polimer modifiye bitümlerin davranışını göstermesi açısından yumuşama noktasının uygunluğu soru

işaretidir, bu nedenle bu özelliğin tayini için alternatif deney metodları araştırılmaktadır (Southern, M., 2015).

3.2.5.3. Fraas kırılma noktası deneyi (EN 12593, AASHTO T 315, ASTM D7175)

Fraas kırılma noktası deneyi çok düşük sıcaklıklardaki (-30°C 'ye kadar) bitümün davranışının tayininde kullanılan deneylerden biridir. Temelde bitümün kritik sertliğe ulaşarak çatladığı sıcaklığı tespit edebilen bir alettir. Deney numunesi dakikada 1°C sıcaklık azalışı yapılarak tekrarlı eğilmeye maruz bırakılır. Numunede ilk çatlağın oluştuğu sıcaklık Fraas kırılma noktası olarak kaydedilir. İki sonucun ortalaması nihai Fraas kırılma değeri olarak alınır ancak ölçülen iki değer arasındaki sıcaklık farkının 2°C 'yi geçmemesi gerekir. Aksi takdirde iki deney daha gerçekleştirilir (Hunter, vd. 2015; Nikolaides, A., 2015).

Deney plakaları 41 mm uzunluğunda, 20 mm genişliğinde ve 0,15 mm kalınlığındadır. Bitüm ile kaplanan plaka Fraas düzeneğine yerleştirilir ve beklenen kırılma noktasından en az 15°C yüksek başlangıç sıcaklığı seçilir (Nikolaides, A., 2015).

3.2.5.4. Düktilite deneyi (EN 13589, AASHTO T 51, ASTM D113)

Düktilite deneyi bitümün uzama kabiliyetini göstermektedir. Düktilite; standart bir kalıpta hazırlanmış bir bitüm numunesinin her iki ucundan çekilerek uzatılması sonucunda koptuğu andaki mesafenin cm cinsinden ifadesidir (İSFALT, 2001). Deneyde 25°C sıcaklığındaki su banyosunda bulunan bitüm numunesi, kopuncaya kadar dakikada 5 santimetre uzamaya maruz bırakılır (Speight, 2016; Nicholls, 1998).

Genel olarak; düktilite arttıkça adezyon yeteneği ve çekme mukavemeti artar. Ancak, aşırı yüksek derecede düktiliteye sahip olan bazı bitümlerde daha fazla sıcaklık hassasiyeti görülebilir. Düktilite azaldıkça düşük ısılarda kırılma artar (Speight, 2016; Tunç, 2007).

3.2.5.5. İnce film ısıtma kaybı (TFOT) deneyi (EN 12607, AASHTO T 179, ASTM D1754)

TFOT deneyi, ısı ve havanın bitüm üzerindeki etkilerinin değerlendirildiği, bitümün asfalt plentindeki karıştırma esnasında maruz kaldığı sertleşmenin temsil edildiği bir deneydir.

Bu şartlandırma prosedüründe $50 \pm 0,5$ g'lık bitüm numunesi 140 mm çapındaki paslanmaz çelik veya alüminyum numune tepsisine konularak, 163°C 'de muhafaza edilen hava veren etüve yerleştirilir. Numunenin yerleştirildiği raf 5 saat boyunca dakikada 5-6 dönüş yapacak şekilde döner. Isıtma işlemi sonucunda numunenin kütleğinde oluşacak değişimin yanı sıra penetrasyondaki kayıp ve viskozitedeki artış da ölçülebilir. Deneyin amacı ısı ve havanın bitüm üzerindeki etkilerinin değerlendirilmesidir. Yağlı bileşenlerin buharlaşması (volatilizasyon) ve oksidasyon nedeniyle aşırı derecede sertleşen bitümün tespit edilmesidir (Mallick ve Korchi, 2013; Nikolaides, A., 2015; Garber ve Hoel, 2009).

3.2.5.6. Özgül ağırlık deneyi (TS 1087, AASHTO T 228, ASTM D70)

Bir maddenin özgül ağırlığı belirli sıcaklıkta maddenin kütlelerinin, aynı sıcaklıkta eşit hacimdeki suyun kütlelerine oranı olarak tanımlanır. Deneyde önce ağırlığı bilinen bir numune ile beraber kalibre edilmiş bir piknometre tartılır ve sonrasında su ile doldurulur. Ağzı kapatılan piknometre $25^{\circ}\text{C} \pm 0,5^{\circ}\text{C}$ 'de 30 dakika bekletilir sonra yeniden tartılır. $15-25^{\circ}\text{C}$ sıcaklık aralığında suyun yoğunluğunun $999,1-997 \text{ kg/m}^3$ arasında değiştiğine dikkat edilmelidir. Özgül ağırlık; bitüm tedarikçilerine ve yüklenicilere yapılacak ödemelerde ağırlığın hacme ve hacimin ağırlığa dönüştürülmesinde kullanılır (Mallick ve Korchi, 2013).

3.2.5.7. Çözünürlük deneyi (AASHTO T44, ASTM D2042)

Çözünürlük deneyi, bitüm içerisindeki yabancı madde (safsızlıkların) miktarının ölçülebilmesi için yapılır. Bitüm, bazı çözücülerin içinde %100 çözünebilir olduğundan, bu deney ile agregaları birbirine bağlamakta etkili olacak bitüm oranının tespiti

yapılabilmektedir. Çözünmeyen maddeler, serbest karbon, tuz ve diğer inorganik safsızlıkları içerir (Garber ve Hoel, 2009).

Deneyde miktarı bilinen bitüm numunesi bir çözücü (triklor etilen gibi) ile karıştırılır ve Gooch krozesi ile filtre edilir. Filtre üzerinde kalan yabancı maddeler yıkanır, kurutulur ve tartılır. Deney bitüm içerisindeki toz ve organik maddeler gibi safsızlıkların varlığını minimuma indirmek amacıyla gerçekleştirilir (Mallick ve Korchi, 2013).

3.2.5.8. Parlama noktası deneyi (EN 22592, AASHTO T 48, ASTM D92)

Bu deney parlama noktası 79°C'nin üzerinde olan petrol ürünlerine uygulanır. Parlama noktası ısıtılan deney numunesinin buharına deney alevinin temas ettirilmesi sonucunda numunenin parladığı fakat yanmaya devam etmediği en düşük sıcaklıktır (İSFALT, 2001).

Deneyden BSK üretiminde herhangi bir güvenlik tehlikesine yol açmadan kullanılabilecek sıcaklık aralığının tayininde yararlanır.

3.2.5.9. Viskozite deneyleri (EN 12595, AASHTO T 72, ASTM D88)

Viskozite, bitümün belirli bir sıcaklıkta veya sıcaklık aralığında davranışını belirleyen önemli özelliklerinden biridir. Viskozite, sıvının akmaya karşı gösterdiği direnç olarak tanımlanır. Hareket eden akışkanın iç sürtünmesini belirtir. Bir başka deyişle sıcaklık arttıkça azalan, sıcaklık azaldıkça artan, birbirine bağlanma (koherans) veya akışkanlık ile ilgili bir ifadedir (Nikolaides, A., 2015).

Viskozite deneyi, bitümün kıvamlılığının tayini amacıyla yapılmaktadır. Saybolt ve furol olmak üzere iki çeşit viskozite değeri vardır. Saybolt viskozitesi, standart bir tüp içine konulan bitüm numunesinin belirlenen deney sıcaklığına kadar ısıtıldıktan sonra 60 cm³ hacmindeki toplama kabını doldurması için geçen zamanın saniye cinsinden değeridir.

Viskozite deneyi sırasında standart tüp olarak universal delikli tüp kullanılıyorsa “saybolt universal”, furol delikli tüp kullanılıyorsa “saybolt furol” viskozite adını alır. Furol viskozite yaklaşık olarak universal viskozitesinin onda biridir (İSFALT, 2001).

$$\text{Saybolt Üniöersal Viskozitesi (s)} = 10 \times \text{Saybolt Furol Viskozitesi (s)} \quad (3.11)$$

Viskozite direkt deneylerle ölçülebilmesine rağmen, genellikle indirekt yöntemlerden yararlanılır. İki çeşit viskozite deneyi gerçekleştirilir; 60°C’deki mutlak viskozite (poise olarak ifade edilir) (AASHTO T 202, ASTM D2171) ve 135°C’deki kinematik viskozite (santistok) olarak ifade edilir (AASHTO T 201, ASTM D2170). Viskozite deneyleri bitümlerin sınıflandırılmasında kullanılır (mutlak viskozite). ASTM D3381 farklı tipteki viskozite sınıfı bitümler için şartnameleri içerir (Mallick ve Korchi, 2013).

3.2.5.10. Depolama stabilitesi denevi (EN 13399, ASTM D7173)

Bu deney yöntemi bitümün yüksek sıcaklıklardaki depolama stabilitesinin tayininde kullanılır. Özellikle polimer modifiye bitümlerde daha çok depolama esnasında faz ayrışması (yoğunluğa göre farklı tabaka oluşması) görülmektedir.

EN 13399 standardına göre, homojen bir modifiye bitüm numunesi alüminyum tüp içerisine yerleştirilir, sonrasında 180±5°C’deki etüvde üç gün boyunca saklanır. Etüvden çıkarılan numune soğumaya bırakılır ve üç eşit parçaya ayrılacak şekilde kesilir. Bitümün karakteristik özelliklerindeki değişimin tayini için tübün alt ve üst parçasındaki numuneler deney tabi tutulur. Genellikle üç günlük depolama sonrasındaki penetrasyon ve yumuşama noktası tayin edilerek depolama öncesindeki değerler ile karşılaştırılır. Değerler arasındaki farklar EN 13399 standardında belirtilen sınır değerler ile uyumlu olmalıdır (Nikolaides, A., 2015).

Alt ve üst parça numuneleri deney sonuçları arasındaki farkın büyük olması, bitüm ile polimer arasındaki uyumsuzluğun göstergesidir. İki numune yumuşama noktası arasındaki fark 2-5°C’den daha az ise (kesin değer için uygulama bölgesi şartnamesi esas alınır.), bitümün depolama stabilitesi uygun kabul edilir.

Depolama stabilitesi ve bitüm özelliklerini etkileyen başlıca faktörler:

- Bitüm içerisindeki asfaltın miktarı ve molekül ağırlığı, malten fazın aromatikliği,
- Mevcut polimer miktarı, polimerin molekül ağırlığı ve yapısı,
- Depolama koşulları (sıcaklık, zaman, karıştırma şekli vb.) (Hunter vd., 2015)

3.3. Yaşlanma

Bir asfalt betonunun hizmet ömrünü tamamlamasında depolama, üretim veya hizmet ömrü boyunca aşırı sertleşmemesi oldukça önemlidir. Bitüm; diğer organik maddeler gibi oksijen, ultraviyole ışınlar ve sıcaklık değişimlerinden etkilenir. Bu dışsal etkiler nedeniyle bitümün sertleşmesi ve fiziksel özelliklerinde meydana gelen değişime “yaşlanma” denir. Bitümün yaşlanmasına etki eden en önemli faktörler; oksidasyon, uçucu madde kaybı ve fiziksel sertleşme’dir. 100°C sıcaklığın üzerindeki her 10°C sıcaklık artışında bitümdeki oksidasyonun da iki kat arttığı bilinmektedir (Hunter vd., 2015).

Asfalt betonların yaşlanmasını etkileyen faktörler;

- Bitüm özellikleri ve karışım içindeki oranı,
- Agreganın yapısı ve dane boyut dağılımı,
- Karışımındaki boşluk oranı,
- Sıcaklık ve zaman gibi üretim ile ilgili unsurlardır (Speight, 2016).

Bitüm organik moleküllerden oluştuğundan, çevredeki oksijen ile reaksiyona girer. Bu reaksiyona oksidasyon adı verilir ve bitüm moleküllerinin yapı ve bileşimini değiştirir. Oksidasyon, bitümün daha kırılgan olmasına sebep olan oksidasyon sertleşmesi denilen bir etkiye neden olur. Oksidasyon sertleşmesi kaplamada nisbeten düşük oranlarda meydana gelse de, sıcak iklim ve sezonlarda sertleşme hızlanmaktadır. Bu sertleşme nedeniyle, eski asfalt beton üstyapılar yeni üstyapılara göre çatlamaya daha duyarlı hale gelir. Ancak düzgün sıkıştırılmayan asfalt beton üstyapılarda zamanından evvel oksidasyon sertleşmesi görülebileceği unutulmamalıdır. Bu durumda; yetersiz sıkıştırma nedeniyle asfalt beton karışım içerisine hava nüfuz eder ve üstyapı ömrünün erken dönemlerinde oksidasyon sertleşmesi ile karşılaşılabilir (Asphalt Institute, 2007).

Yaşlanma nedeniyle oluşan sertleşme; sıkıştırılmış asfalt beton kaplamadaki hava boşluğu oranından önemli ölçüde etkilenmektedir. Oksidasyon ve dolayısıyla sertleşme yeterli sıkıştırma yapılarak boşluk oranının düşürülmesi ve tercihen %5'in altına çekilmesi ile minimize edilebilir (Mallick ve Korchi, 2013).

Pratikte, önemli miktarda oksidasyon sertleşmesi asfalt beton karışım serilmeden önce oluşur. Sıcak karışım esnasında, bitüm sıcak agregaya ilave edilirken, karışım bir süre yüksek sıcaklıkta kalır. Bitüm, agregayı saran ince bir film halinde olduğundan, bu aşamada oksidasyon reaksiyonu oldukça hızlı bir oranda gerçekleşir (Asphalt Institute, 2007).

Karıştırma esnasında bitümün aşırı ısıtılarak viskozitesinin düşürülmesi suretiyle yüksek işlenebilirlik sağlanmakla beraber, yüksek sıcaklığa bağlı olarak oluşan oksidasyon ve neticesindeki yaşlanma BSK'nın performansını olumsuz yönde etkileyecektir.

Yüksek sıcaklıklar, ultraviyole radyasyon nedeniyle foto oksidasyon ve nisbeten yüksek oranda oksijen varlığı nedeniyle asfalt beton kaplamanın yüzeyindeki bitümde oluşan sertleşme, kaplamanın içindeki bitüme göre daha hızlı olmaktadır.

Diğer yaşlanma türleri gaz haline gelme (volatilizasyon) ve fiziksel sertleşmeyi içerir. Gaz haline gelme; sıcak karışım ve inşaat esnasında oluşur. Uçucu bileşenler bitümden buharlaşma eğilimindedir. Fiziksel sertleşme, bitüm düşük sıcaklıklara uzun süre maruz bırakıldığında meydana gelir. Sıcaklık belirli düşük bir değere geldiğinde, bitüm büzülme ve sertleşmeye devam eder. Fiziksel sertleşme 32°F (0°C) altındaki sıcaklıklarda oluşur ve bitümün düşük sıcaklık testlerinde mutlaka dikkate alınmalıdır (Asphalt Institute, 2007).

Bitüm yapısal olarak hava (oksijen), ultraviyole radyasyon ve sıcaklık dalgalanmalarından etkilenir. Bunun neticesinde hem üretim aşamasında hem de kaplamanın hizmet ömrü boyunca bitüm sertleşir. Bitüm seçilirken sertleşme göz önüne alınmalıdır. Çünkü bitümün aşırı sertleşmesi, BSK'larda çatlak oluşma potansiyelini artırmaktadır. Bitümün sertleşmesi; kaplama yüzeyinde olduğu gibi kaplama içerisindeki karışımda da gerçekleşmektedir (Mallick ve Korchi, 2013).

Farklı çevresel faktörler ve mekanizmalar bitümün sertleşmesine neden olur. Aşağıda listelenen 15 farklı faktörden ilk 4'ü bitüm sertleşmesinde daha önemli rol oynar (Hunter vd., 2015; Mallick ve Korchi, 2013).

- Karanlıkta Oksidasyon
- Volatilizasyon (Gaz haline gelme)
- Sterik veya fiziksel faktörler
- Yağların absorpsiyonu
- Direkt ışık ile foto oksidasyon
- Yansıyan ışık ile foto oksidasyon
- Direkt ışık ile foto kimyasal reaksiyon
- Yansıyan ışık ile foto kimyasal reaksiyon
- Polimerizasyon
- Nükleer enerji ile değişim
- Suyun hareketi
- Katıların absorpsiyonu
- Katı bir yüzeydeki bileşenlerin absorpsiyonu
- Kimyasal reaksiyonlar
- Mikrobiyolojik bozulma

Depolamaya, karıştırmaya ve kaplamaya etkiyen farklı faktörler nedeniyle bitüm sertleşmesi farklı ölçülerde meydana gelir. Karıştırma esnasında, bitüm nisbeten yüksek sıcaklıklara maruz kalır ve agrega üzerine yaklaşık 5-15 mikron film tabakası oluşturacak şekilde püskürtülür. Farklı plent tipleri için karıştırma süreleri de farklı olabilmektedir. Seçilen bir bitüm için, yaşlanmanın minimize edilebilmesi ve agreganın üzerinin yeterli kalınlıkta bitüm film tabakası ile kaplanması için, sıcaklık ve bitüm oranı düzenli olarak kontrol edilmelidir. Bitüm film kalınlığı azaldığında sertleşme artmaktadır (Mallick ve Korchi, 2013).

Kandhal ve Chakraborty (1996) tarafından yapılan çalışmada, toplam altı bitüm film kalınlığı için asfalt beton karışımlar hazırlanmış olup, bunlar; 3,7; 5,6; 7,4; 9,3; 11,1 ve 13,0 mikrondur. Esas olarak, deneysel tasarım çalışmalarında hedeflenen film kalınlıkları 4, 6, 8, 10, 12 ve 14 mikrondur. Gevşek asfalt beton karışım numuneleri (SHRP

#1025 prosedürü kullanılarak) kısa dönem yaşlanmaya maruz bırakılmıştır. (4 saat boyunca 135°C) Ayrıca, abson metodu ile geri kazanılan bitüm üzerinde Dinamik Kesme Reometresi (DSR) 64°C’de Kompleks modül G^* ve faz açısı δ değerleri tespit edilmiştir.

Kısa dönem yaşlandırılmaya müteakip, her karışım tipinden 5’er adet 100 mm çapında numune sıkıştırılmıştır. Bu amaçla gyratory kompaktör kullanılmış olup, numuneler ± 1 hava boşluğu oranında hazırlanmıştır. Sıkıştırılan numunelerin hepsi için 25°C’de esneklik modülü (MR) tespit edilmiştir. Sıkıştırılan numuneler daha sonra (SHRP#1030 prosedürü kullanılarak) uzun dönem yaşlanmaya maruz bırakılmıştır. (120 saat süre ile 85°C) Bu çalışmada, kaplamanın hizmet ömrü boyunca oluşan uzun dönem yaşlanmanın temsili için, PAV test cihazında bitümün yaşlandırılması yerine SHRP tarafından geliştirilen sıkıştırılmış asfalt beton numunelerinin yaşlandırılması metodu kullanılmıştır (Kandhal ve Chakraborty, 1996).

Çalışma sonucunda, bitüm film tabakası kalınlığı ile asfalt beton karışımların kısa ve uzun dönem yaşlanma özellikleri arasındaki ilişki (çekme direnci, esneklik modülü, vb.) sayısallaştırılmıştır. Bitüm film tabakası kalınlığı ile yaşlandırılmış asfalt beton karışımların esneklik modülü arasında oldukça iyi bir korelasyon elde edilmiş, optimum film tabakası kalınlığının 9-10 mikron olduğu tespit edilmiştir (Kandhal ve Chakraborty, 1996).

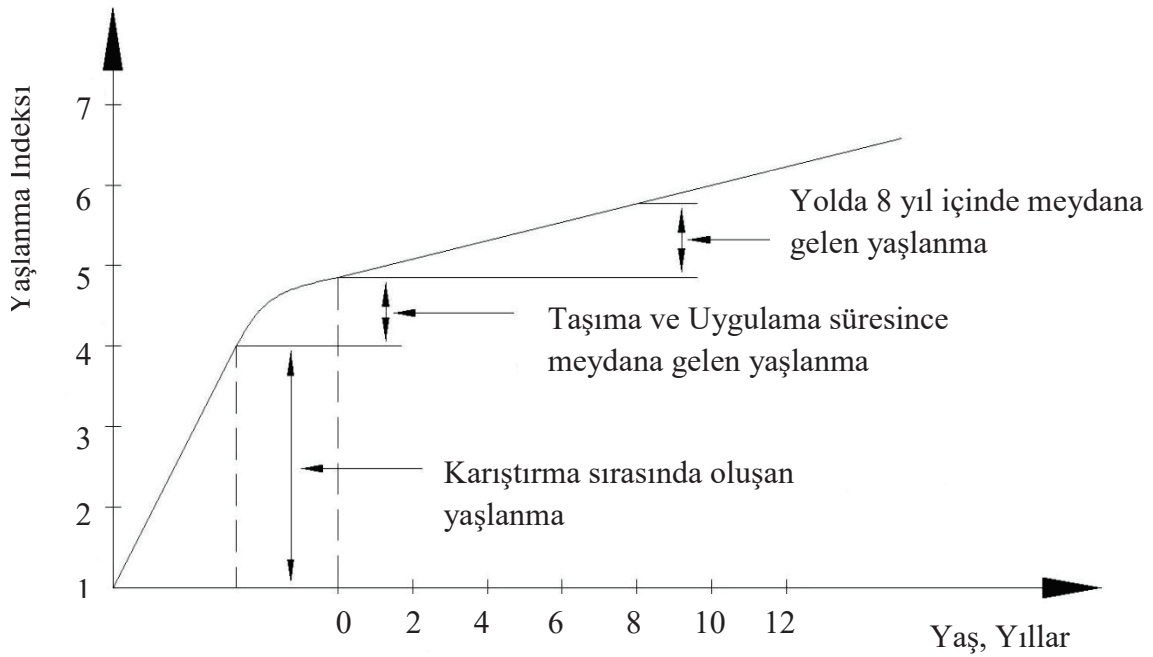
Yapılan çalışmalar yaşlanmanın iki aşamada oluştuğunu göstermektedir.

- Kısa Dönem Yaşlanma
- Uzun Dönem Yaşlanma

Kısa dönem yaşlanma; sıcak karışımın depolanma, plente taşınma, plentte karıştırılma, şantiyeye taşınma, serilme ve sıkıştırılma işlemleri sırasında oluşur. Uzun dönem yaşlanma ise; yolun hizmet ömrü boyunca oluşmaktadır. Bitümün karıştırma, depolama, taşıma, uygulama ve hizmet süresince yaşlanması Şekil 3.9’ da verilmiştir.

Asfalt beton kaplamaların mevcut durumunu korumak veya bozulma miktarını azaltmak amacıyla yapılan uygulamalara koruyucu bakım denilmektedir. Bu kapsamda yapılan gençleştirme (rejuvenation), bitümün özelliklerini iyileştirmek amacıyla kaplama

yüzeyine seyreltilmiş emülsiyon veya polimer kompozit tabaka uygulanmasıdır. Gençleştirme neticesinde bitüm daha elastik ve esnek olmakta, ayrıca yaşlanma süreci geciktirilebilmektedir (Tam, 2006).



Şekil 3.9. Bitümün karıştırma, depolama, taşıma, uygulama ve hizmet süresince yaşlanması (İSFALT, 2001)

3.3.1. Yaşlanmayı etkileyen faktörler

3.3.1.1. Oksidasyon

Oksidasyon, bitümün yaşlanmasında rol oynayan önemli faktörlerden biridir. Organik moleküllerden oluşması nedeniyle bitümün oksidasyonu, bitümün hidrokarbon bileşenlerinin havanın oksijeni ile birleşmesi şeklinde tanımlanmaktadır. Bu reaksiyonda, bitüm hidrojen ve karbonun bir kısmını kaybetmektedir.

Bitüm bileşenleri okside olarak daha ağır ve daha karmaşık moleküller oluştururlar, bu durum neticesinde bitümün sertliği artar, esnekliği azalır ve kütlesinde artış meydana gelir. Oksidasyon hızı sıcaklık ve bitüm film kalınlığından etkilenir. Yüksek sıcaklıklar ve

daha ince film kalınlıkları oksidasyonu kolaylaştırır (Lavin, 2003; Hunter vd., 2015; Mallick ve Korchi, 2013).

Jung (2006) tarafından bitüm oksidasyonuna yönelik ABD Texas'da 15 farklı karayolunda yapılan deney sonuçlarının değerlendirilmesi neticesinde; bitüm oksidasyonunun sadece yüzeydeki reaksiyondan ibaret olmadığı tespit edilmiştir. Oksidasyonun asfalt beton kaplamanın tüm derinliği boyunca zararlı etkileri mevcuttur. Laboratuvar koşullarında yaşlandırılan normal bitüme benzer şekilde, kaplama içerisindeki bitüm sertleşerek daha kırılgan hale gelmektedir. Yüzeyden 15 cm derinlikte bile bu durum gözlenmektedir.

3.3.1.2. Buharlaşma ve uçucu madde kaybı (Volatilizasyon)

Bitüm yaşlandıkça, daha düşük moleküler ağırlıktaki bileşenler buharlaşma yoluyla yok olur. Bu süreç özellikle yüksek sıcaklıklarda önemli olup, bitüm kütlelerinde azalmaya yol açar (O'Connell ve Steyn, 2017).

Volatilizasyon, bitümden daha hafif hidrokarbonların buharlaşmasıdır. Bu hafif hidrokarbonların kaybı, asfalt beton malzemenin plastik özelliklerinin de kaybolmasına neden olmaktadır. Sıcaklık ve yüzey alanı buharlaşma da önemli etkenlerdir (Garber ve Hoel, 2009).

Bitüm bünyesinde az da olsa bulunan uçucu maddeler, zamanla ve/veya sıcaklık nedeniyle uçarak bitümün sertleşmesine neden olmaktadır. Penetrasyon cinsi bitümler göreceli olarak daha az uçucu olmakta ve dolayısıyla uçucu bileşen kaybından kaynaklanan sertleşme miktarı daha az olmaktadır.

3.3.1.3. Sterik veya fiziksel sertleşme

Bitüm oda sıcaklığında iken, fiziksel sertleşme oluşur ve genellikle bitüm içindeki moleküllerin yeniden yapılanma veya oryantasyonunun ortaklaşa etkisine ve mumların yavaş kristalleşmesine bağlanır (mumlar viskoz maddeler olup, kristalleşmeleri mümkün

değildir ve kristal kafes yapıya geçemezler.) (O'Connell ve Steyn, 2017; İSFALT, 2001; Hunter vd., 2015).

Yakın dönemde yapılan çalışmalarda, bitüm eritildiğinde asfaltenler ile maltenlerin karıştığı, bitümün soğuyarak yeniden oda sıcaklığına dönmesi ile asfaltenlerin ayrıştığı (segregasyon) ve bağımsız bir mezofaz (sıvı ile katı arasında olan madde) oluşturduğu tespit edilmiştir. Ayrışma zamana bağlı olup, mezofaz oluşumunun bitümün sterik sertleşmesinden sorumlu olduğu değerlendirilmektedir (Masson vd., 2005).

3.3.1.4. Yağların absorpsiyonu

Bitümün malten fazındaki bazı yağ bileşenleri zamanla agregadaki boşluk veya gözenekler tarafından absorbe edilebilir ve bu durum bitümün sertleşmesine neden olur. Kimyasal yapı ve agreganın porozitesine bağlı olarak, her asfalt beton karışımında farklı ölçüde olmak üzere bitümdeki yağlar agregalara doğru hareket eder (O'Connell ve Steyn, 2017; Hunter vd., 2015).

3.3.1.5. Sızıntı sertleşmesi

Bitümden mineral agregaya içerisine yağlı bileşenlerin sızmasından kaynaklanmaktadır. Bu tür sertleşme, hem bitümün sızıntı eğiliminin hem de agreganın porozitesinin bir fonksiyonudur (Hunter vd., 2015).

3.3.1.6. Tiksotropi

Tiksotropi, bitümlerde çok sık karşılaşılan bir olaydır. Bitüm düşük sıcaklıkta kendi haline bırakılınca zamanla artan bir rijitlik kazanmaktadır. Bu rijitliğin sebebi bitümün uçucu bileşenlerinin buharlaşması veya sıcaklığın değişmesi olmayıp, bitümün kolloidal yapısıdır. Kolloidal yapının etkisi ile bitüm belirli bir durgunluk süresinden sonra, soğukta sünger şeklini andıran, üç ekseninde gerilmiş ağ biçiminde ancak elektronik mikroskopta görülebilecek bir yapı kazanmaktadır. Bu yapı zamanla güçlenerek, bitüme dış kuvvetler karşısında elastik cisimlerinkine benzeyen bir rijitlik kazandırmaktadır. Fakat mekanik bir

sarsıntı sonunda bu rijitlik kaybolmaktadır. Aynı rijitliği elde edebilmek için bitümü belirli süre bekletmek gerekmektedir (Tunç, 2007).

Sıcaklığın artışı da bitümün tiksotropiye bağlı rijitliği üzerinde mekanik bir sarsıntıya eşdeğer etkiler doğurmaktadır. Çünkü sıcaklık artışı ile bitümün misellerden (kolloidal tanecikler) oluşan rijitlik dokusu bozulmakta ve miseller birbirlerinden ayrılmaya başlamaktadır. Bunun sonunda bitüm rijitliğini kaybetmektedir.

Özet olarak tiksotropi, kolloidal bir eriyin mekanik veya termik etkiler altında rijitliğini kaybetmesi ve diğer bütün fizik koşulların değişmemesi şartı ile belirli bir durgunluk süresi sonunda aynı rijitliği tekrar kazanması özelliğidir.

3.3.1.7. Sinerisis

Asfalt betonun yapısında meydana gelen değişiklik yüzünden yağlı bir film tabakasının yüzeye çıkması olayıdır.

3.3.1.8. Polimerizasyon

Bitümün hidrokarbon zincirinin zamanla değişime uğraması ve moleküllerin büyümesi olarak tanımlanmaktadır (Tunç, 2007).

3.3.1.9. Yüzey alanı

Malzemenin yüzey alanı, onun oksidasyon ve volatilizasyon oranını etkilemektedir. Malzemenin yüzey alanı ile oksijen absorpsiyon oranı ve buharlaşma nedeniyle kayıp ($\text{g/cm}^3/\text{dak.}$) arasında doğrudan bir ilişki vardır. Ancak, hacim ile oksidasyon ve volatilizasyon oranı arasında ise ters ilişki mevcuttur. Bu, sertleşme oranının, yüzey alanının hacme oranı ile doğrudan orantılı olduğu anlamına gelmektedir (Garber ve Hoel, 2009).

3.3.1.10. Sıcaklık

Sıcaklığın oksidasyon ve volatilizasyon oranı üzerinde önemli etkisi vardır. Sıcaklık ne kadar yüksek ise, oksidasyon ve volatilizasyon miktarı da o kadar fazladır, ancak bu ilişki doğrusal değildir. Oksidasyon ve volatilizasyon miktarındaki artış oranı, bu artışa neden olan, sıcaklık artış oranından çok daha fazladır (Garber ve Hoel, 2009).

Yukarıda sayılan faktörlerin en önemlileri oksidasyon ve buharlaşmadır. Bu iki faktör bitümün yapısındaki kimyasal değişiklik nedeniyle oluşmaktadır. Diğer faktörler ise sadece fiziksel nedenlere bağlıdır. Fiziksel yaşlanmaya maruz kalmış bitüm orijinal viskozite değerine kadar ısıtılacak olursa, yaşlanma büyük ölçüde giderilmekte ancak oksidasyon sertleşmesi kesinlikle giderilememektedir.

3.4. Bitümlü Sıcak Karışımlarda Oluşan Bozulmalar

Yüksek (45-60°C) veya düşük (-10°C altı) kaplama sıcaklıkları ile karşılaşıldığı zaman, yüksek trafik yüklerinin de etkisiyle bitümün viskozitesi veya rijitliği kaplamada tekerlek izi veya çatlak şeklinde erken bozulmalara yol açabilir.

Ağır taşıt sayılarındaki artış, bunların taşıma sistemlerinin değişmesi, dingil ağırlıklarının ve lastik iç basınçlarının artması gibi değişmeler nedeniyle yollardaki bozulmalar hızla artmaktadır.

Aşağıda belirtilen bozulmalardan biri yada birkaçının varlığı halinde asfalt beton kaplamaların performansı ve hizmet ömrü önemli ölçüde azalmaktadır. Bunlar;

- Kalıcı deformasyon,
- Tekerlek izi,
- Yorulma çatlağı,
- Düşük sıcaklık çatlağı,
- Nem hasarı (su kaynaklı hasar),
- Adezyon kaybı'dır (Speight, 2016).

Bitümün yaşlanması da bir faktör olmakla beraber, yaşlanma bazen faydalı ve çoğunlukla zararlı olarak kabul edilmektedir. Performans açısından yeterli bir kaplamada

aşırı sertleşme ve rijitleşme gözlemlendiğinde yaşlanma zararlıdır. Ancak yumuşak bir karışım sertleşerek performans açısından yeterli hale geldiğinde yaşlanma faydalı olarak kabul edilmektedir (Speight, 2016).

BSK kaplamalarda oluşan bozulmaların ana sebepleri; trafik yüklerinin yanı sıra, çevre ve iklim, drenaj yetersizlikleri, malzeme problemleri, imalat yetersizlikleri veya bakım yetersizlik/olmaması da olabilmektedir (Asphalt Institute, 2007).

Yollarda görülen bozulmalar;

- Kalıcı deformasyonlar (Tekerlek izi, Çökme, Kabarma, Ondülasyon, vb.)
- Çatlamalar (Yorulma Çatlakları, Termal Çatlaklar vb.)
- Ayırışmalar (Sökülme, Soyulma vb.) başlıkları altında üçe ayrılabilir.

3.4.1. Tekerlek izi

Asfalt beton kaplamanın yüzeyine yük uygulandığında deforme olur ancak yük kaldırıldığında oluşan deformasyonların büyük bir bölümü geri döner. Bu olay, asfalt betonun viskoelastik bir malzeme olması özelliği ile açıklanabilir. Bununla beraber, çok küçük bir miktar geri dönüşümsüz viskoz deformasyon karışımında olduğu gibi kalır. Milyonlarca yük tekrarı uygulandığında, küçük miktardaki deformasyonlar birikir ve en sonunda yüzeyde tekerlek izi ile neticelenir. Bu deformasyonun miktarı, çevresel sıcaklıktan olduğu kadar uygulanan yük tekrarlarının sayısı ve miktarından da büyük ölçüde etkilenir (Moghaddam vd., 2014).

Tekerlek izi, yoldaki boyuna çökmelerdir. Tekerlek izi kaplama yüzeyindeki fiziksel bir burulma olup, yağış esnasında suyun drenajını engeller. Bu durum tekerlek izi olan bölgelerde su birikmesine ve hidroplaning nedeniyle kazalara sebep olur (Sun, 2016).

Genellikle tekerlek izi derinliği 0,5 inç (1,27 cm)'e ulaştığında kaplamada tekerlek izi bozulması olduğu kabul edilir. Tekerlek izi; kalıcı deformasyonlarda artış ve birikime neden olan tekrarlı yükler neticesinde oluşur (Mallick ve Korchi, 2013).

Kaplamada oluşan ortalama tekerlek izi derinliklerine göre bozulma seviyeleri değerlendirildiğinde; tekerlek izi derinliği 1/4 inç - 1/2 inç (0,64-1,27 cm) arasında ise düşük seviyede, 1/2 inç – 3/4 inç (1,27-1,90 cm) arasında ise orta seviyede, 3/4 inç (1,90 cm) üzerinde ise yüksek seviyede bozulma olduğu değerlendirir (Northwest Pavement Management Association, 1999).

Tekerlek izi oluşumuna neden olan başlıca faktörler ticari taşıtların yasal sınırların üzerinde yüklenmesi, bunların düşük hızda hareket etmesi, uzun süreli veya durağan yükler, aşırı yük tekrarı, trafik yüklerine veya iklim koşullarına uyum olmayan malzeme kullanımı, tasarım ve yapım hataları olarak sıralanabilir.

Hizmet ömrünün ilk dönemlerinde asfalt beton kaplamalar tekerlek izi oluşumuna meyillidir. İnşaat sonrasındaki tekrarlı trafik yükleri asfalt beton üstyapıdaki konsolidasyonu artırır, dolayısıyla tekerlek izleri boyunca çökmeler oluşur. Trafik kaynaklı tekerlek izi; yol boyunca mevcut asfalt beton malzemenin yanal akmasından da kaynaklanabilir.

Asfalt beton kaplamaların tekerlek izi potansiyeli esasen inşaat esnasında yapılan sıkıştırmanın kalitesi ile ilgili olmakla beraber; karışım tasarımı, agrega köşeliliği, agrega yapısı ve bitüm kıvamlılığı göz önüne alınması gereken diğer etkenlerdir.

Yüksek sıcaklıklarda, bitümün artan akışkanlığı nedeniyle tekerlek izi oluşumu daha yaygındır. Asfalt beton kaplamalarda tekerlek izi oluşma ihtimali zamanla azalmaktadır çünkü bitüm yaşlanma nedeniyle oluşan sertleşme neticesinde daha rijit bir hal almaktadır (Zaniewski ve Pumphrey, 2004).

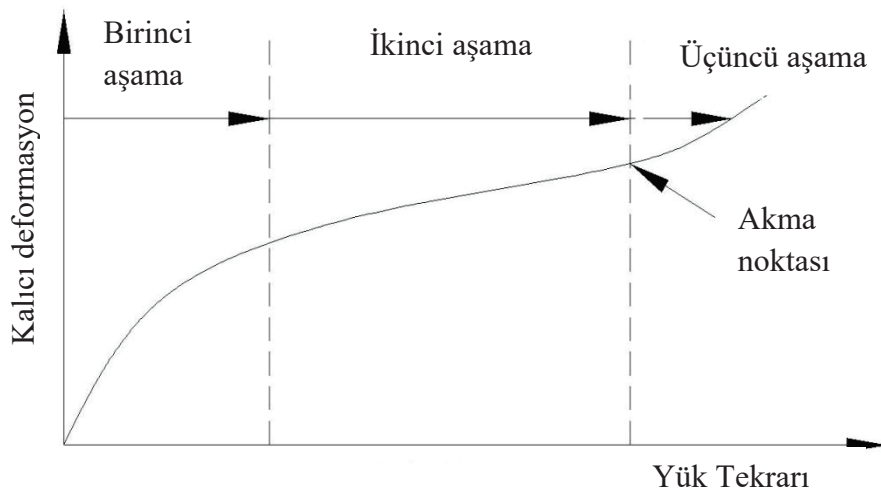
Tekerlek izi oluşumu yolun enine düzgünlüğünün bozulmasına neden olur. Enine düzgünlüğü kabul edilebilir sınırların üzerinde bozulan bir yol, konfor ve güvenlik açısından büyük sorunlar ortaya çıkarır. Bu sorunlar; şerit değiştirme sırasında araç içerisindeki kişilerin rahatsız olması ve araç kontrolünün zorlaşması, yağışlı havalarda tekerlek izi oluşmuş kısımlarda su birikmesi, biriken suyun buzlanmaya veya tekerleğin su filmi üzerinde kaymasına neden olması ve dolayısıyla fren mesafesinin uzaması şeklinde sıralanabilir.

Normal bitüm kullanıldığında, karışımın teker izi direnci karışımın rijitliğine bağlıdır; daha rijit karışımların direnci daha fazladır. Karışım tasarımı iyi yapılmış BSK'lar için, daha iyi sıkıştırma yapılarak karışımın rijitliğinin artırılabilmesi mümkündür (Long, 2001).

Karışımındaki bitüm oranı arttıkça, karışım giderek tekerlek izine müsait duruma gelmektedir. Bitüm oranı düşük olduğunda, karışımın işlenebilirliği azalmakta, netice olarak BSK'nın sıkıştırılabilmesi zorlaşmakta ve bu durum yüksek hava boşluğuna sahip BSK ile sonuçlanmaktadır.

Yüksek hava boşluğu; karışımın kayma direncinin azalmasına neden olmaktadır. Çünkü bitüm kolaylıkla hava boşluklarına doğru hareket edebilmektedir. Yüksek tekerlek izi dayanımı için, düşük hava boşluğu oranı tercih edilir. Ayrıca, düşük bitüm ve yüksek hava boşluğu oranı BSK'nın durabilite ve yorulma çatlağı direncini olumsuz etkileyebilecektir (Long, 2001).

BSK malzemelerin yükleme ve çevre koşulları altındaki kalıcı deformasyon davranışlarında Şekil 3.10' da gösterildiği üzere üç farklı aşama bulunmaktadır.



Şekil 3.10. Tekrarlı yük altında kalıcı deformasyon davranışı (Witczack ve El-Basyouny, 2004; Kutluhan ve Açar, 2009; Hunter vd., 2015)

Birinci aşamada, hacimsel değişimden kaynaklanan yüksek bir başlangıç deformasyonu görülür. Yük tekrar sayısı arttığında, kalıcı deformasyon da artar. Ancak bu artış, her bir yük tekrarında oluşan plastik deformasyonun azalması nedeniyle azalan bir artıştır. İkinci aşamada yine hacimsel değişimden kaynaklanan sabit bir artış görülür. Bununla birlikte kayma deformasyonları da artar. Üçüncü aşamada ise, hacimsel değişim olmaksızın yalnızca plastik kayma deformasyonları nedeniyle yüksek oranlı kalıcı deformasyon oluşur.

Asfalt betonu üstyapılarda tekerlek izi derinliği yük tekrar sayısıyla artar. Genellikle araç tekerleklerinin yola değdiği bölümlerde boyuna yönde çökmeler, kenarlarda ise küçük miktarlarda yükselmeler şeklinde görülür. Tekerlek izi oluşumunda yoğunlaşma (sıkışma, hacimde azalma) ve kayma deformasyonunun önemli rolleri vardır.

Araştırmalar tekerlek izi hasarının genellikle üstyapı ömrünün ilk birkaç yılında meydana geldiğini, bu nedenle tasarımda yükleme oranının esas alınması gerektiğini göstermektedir. Karışım tasarımında bunun uygun bir şekilde hesaba alınabilmesi için, tasarım mühendisi toplam yükleri bir yükleme oranına dönüştürerek 20 yıl eşdeğer tek dingil tasarım yükünü kullanmalıdır.

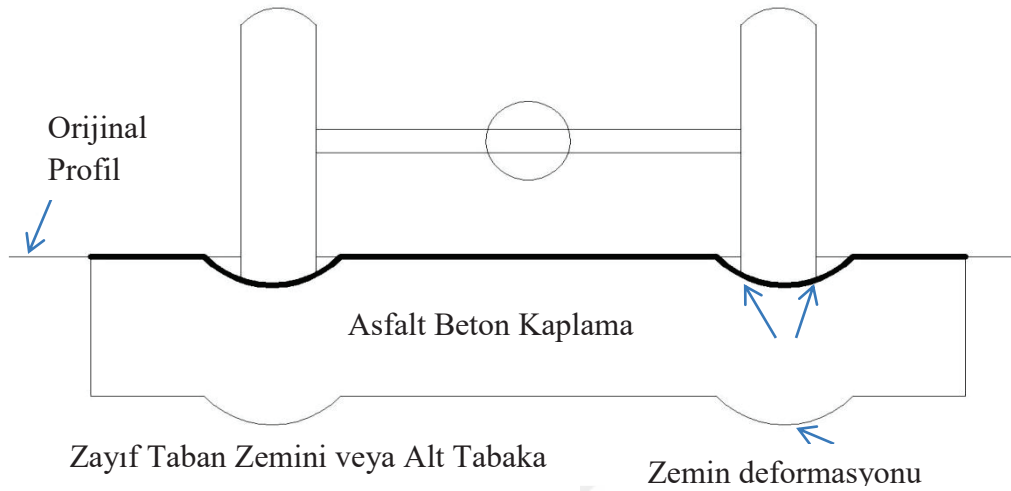
Farklı nedenlere bağlı olarak dört çeşit tekerlek izi oluşum şekli vardır. Bunlar;

- Yapısal tekerlek izi,
- Akma tekerlek izi,
- Aşınma tekerlek izi,
- Oturma (konsolidasyon) tekerlek izi'dir. (Huber, 1999; Kutluhan ve Ağar, 2009)

3.4.1.1. Yapısal tekerlek izi

Bitümlü tabakanın altındaki (taban zemini dahil) bir veya daha fazla tabakanın kendi içlerindeki deformasyonlarının sonucudur. Bunun nedeni, yükten dolayı oluşan gerilmelerin malzeme dayanımını aşmasıdır. Yapısal tekerlek izi Şekil 3.11'de gösterilmiş olup, tekerlek izinin etrafında kabarmalar oluşmaz.

Bu tip tekerlek izi oluşumu genellikle gerçek trafik koşullarına uygun tasarlanmamış üstyapılarda görülür. Aynı zamanda uygun olmayan (düşük kaliteli) malzemenin kullanılmasından, malzemenin iyi sıkıştırılmamasından, kötü drenajdan, donma ve çözülme etkilerine karşı önlem alınmamasından da kaynaklanabilir (Kutluhan ve Ağar, 2009).

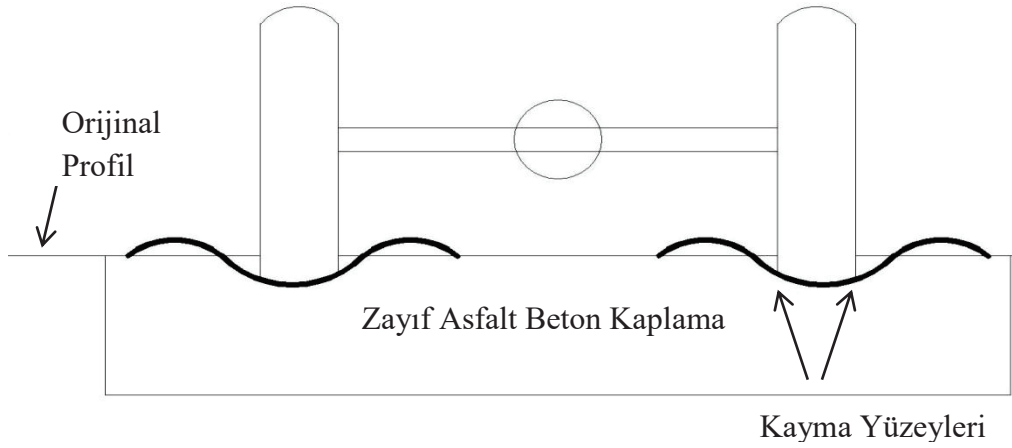


Şekil 3.11. Yapısal tekerlek izi (McGennis vd., 1995; Hicks vd., 2003; FHWA, 1997)

3.4.1.2. Akma tekerlek izi

Bitümlü tabaka veya tabakaların kendi içlerindeki deformasyonların sonucudur. Nedeni, yükten dolayı oluşan gerilmelerin bitümlü malzemenin dayanımını aşmasıdır. Şekil 3.12’de gösterildiği üzere tekerlek izi etrafında kabarmalar oluşur.

Akma tekerlek izi en çok çıkış eğimli kesimlerde, kavşak yaklaşımlarında ve kurlarda, yani ağır taşıtların hızlarını azalttığı kesimlerde ve lastik ile kaplama arasındaki değme alanında ortaya çıkan teğetsel gerilmelerin yüksek olduğu kesimlerde oluşur. Bu tip tekerlek izi oluşumunda etkili olan faktörler, bitümlü karışımdaki bileşenlerin özellikleri ve karışım oranlarıdır (Kutluhan ve Ağar, 2009).

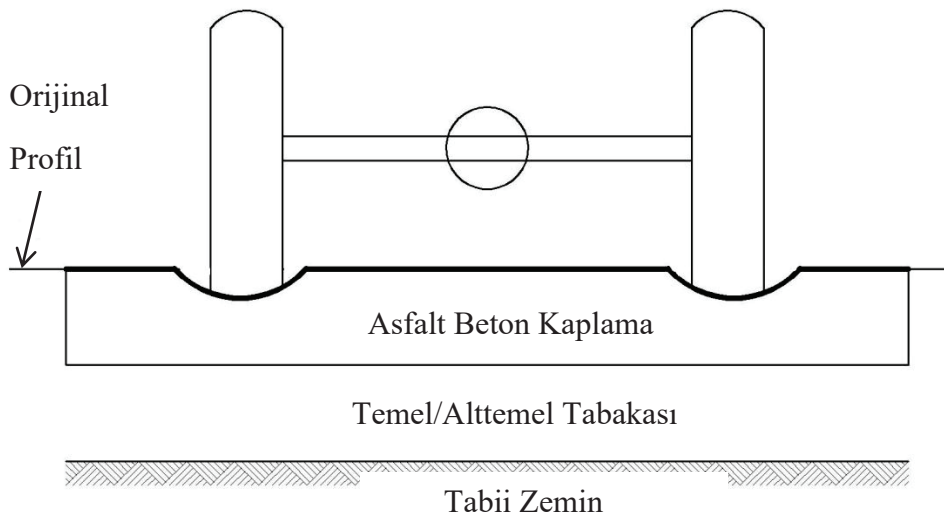


Şekil 3.12. Akma tekerlek izi (McGennis vd., 1995; Hicks vd., 2003; FHWA, 1997)

3.4.1.3. Aşınma tekerlek izi

Yüzeysel tekerlek izi tiplerinden olan aşınma tekerlek izi, kışın çivili lastiklerin kullanılmasından dolayı, yüzeydeki agregaların aşınması nedeniyle oluşur. Özellikle çivili lastiklerin kullanıldığı Kuzey Avrupa ülkelerinde görülmektedir. Bu tip tekerlek izinde göz önüne alınacak parametre agrega sertliğidir (Huber, 1999; Kutluhan ve Ağar, 2009).

Aşınma tekerlek izinin görülmesi nedeniyle, diğer Avrupa ülkelerine göre kuzey ülkelerinde (İsveç ve Finlandiya) daha iri tane boyutlu agregaya gradasyonları kullanılmaktadır. Aşınma tekerlek izi Şekil 3.13’de gösterilmiştir.



Şekil 3.13. Aşınma tekerlek izi (McGennis vd., 1995; Hicks vd., 2003; FHWA, 1997)

3.4.1.4. Oturma (konsolidasyon) tekerlek izi

Aşınma tekerlek izi ile aynı şekle sahip olup, yüzeysel tekerlek izi sınıfına girer. Kaplama yapımı sırasındaki sıkıştırmanın yetersizliği nedeniyle oluşur. Yetersiz sıkıştırılmış bir karışım, özellikle sıcak havalarda, duran veya yavaş hareket eden trafiğin mevcut olduğu kavşaklarda, trafik etkisiyle oturmaya meyillidir. Bu tip tekerlek izinde kenarlarda kabarma oluşmaz (Huber, 1999; Hicks vd., 2003; Kutluhan ve Ağar, 2009).

3.4.2. Tekerlek izi oluşumunun nedenleri

Tekerlek izi oluşumunu etkileyen en önemli faktörler, bitüm tipi ve oranı, agrega tipi ve gradasyonu, hava boşluğu oranı, stabilite, akma, yüksek trafik hacmi ve yüksek lastik iç basınçları olarak sıralanabilir.

BSK'lardaki tekerlek izi oluşumunda etkili olan faktörler iç ve dış olmak üzere iki gruba ayrılabilir:

Dış Faktörler:

- Araç faktörleri (Dingil Yüğü, lastik iç basınçları, yükleme hızı vb.)
- İklim koşulları (Sıcaklık, yağış, donma ve çözülme)
- Yol geometrik parametreleri (eğim, kurb yarıçapı)

İç Faktörler:

- Agrega (agrega türü, gradasyon, tane şekli)
- Bitüm (bitüm tipi, bitüm oranı)
- BSK bileşimi (hava boşluğu oranı, stabilite, akma)
- Tasarım ve yapım hataları

3.4.2.1. Dış faktörler

- Araç faktörleri

Üstyapıların tasarımında göz önünde bulundurulana ana faktörlerden biri trafiktir. Son yıllarda ticari taşıtların geometrik özellikleri hızlı gelişim göstermiş ve ağırlıkları

oldukça artmıştır. Ticari taşıt sayısının artması ve bunların yasal sınırın üzerinde yüklenmesi, trafiğin yolda oluşturduğu bozucu etkiyi büyük ölçüde artırmıştır.

Fransa’da yapılan bir çalışmada, tek tekerlekli üçlü dingilli 400 kN (40 t) ağırlığındaki bir taşıt ile çift tekerlekli tek dingilli 190 kN (19 t) diğer bir taşıtın yola verdiği zarar tekerlek izi açısından karşılaştırılmış ve üçlü dingilli taşıtın 4 kat daha fazla zarar verdiği görülmüştür. Bunun nedeni yükün ağır olması ve yüksek lastik iç basınçlarına sahip, geniş tabanlı tek tekerleğin kullanılmasıdır. Yüksek lastik iç basıncına sahip tek tekerleğin yol yüzeyindeki değme alanı çift tekerleğinkinden daha küçüktür. Dolayısıyla aynı yüke sahip olsalar dahi, yüksek lastik iç basıncına sahip tek tekerlek yola değme noktasında daha büyük gerilme oluşturacağı için, yola verdiği zarar daha fazla olacaktır (Verstraeten, 1995).

Kamyonlar binek otomobillerden çok daha yüksek lastik basınçlarına sahiptir. Binek otomobillerin lastik basınçları 30-35 psi civarında iken, kamyonların lastik basıncı 100-115 psi mertebesinde dir. Yüksek lastik basınçları kaplama yüzeyinde daha yüksek temas basınçları oluşturduğundan, yüzey tabakasında daha hızlı bozulmalara neden olur (Tam, 2006).

ABD’de yapılan bir çalışmada, tekerlek sayısının neden olduğu tekerlek izi hasarı incelenmiştir. Sonuçta geniş tabanlı tek tekerleğin, çift tekerleğin oluşturduğu tekerlek izi derinliğinin yaklaşık iki katı derinliğe neden olduğu görülmüştür (Verstraeten, 1995).

Taşıt tekerleklerinin trafik şeridi içerisinde takip ettikleri izin genişliği olarak tanımlanan “gezinti” miktarı da tekerlek izi oluşumuna etki eder. Taşıtların büyük bir kısmının aynı noktalardan geçmesi, gezinti miktarının az olduğunu gösterir. Gezinti miktarı arttığında yük daha geniş bir alana yayıldığı için, tekerlek izi derinliği azalır.

- İklim koşulları

Yüksek sıcaklık, yağış, nem ve donma-çözülme gibi iklim koşullarına bağlı değişkenler tekerlek izi oluşumunda önemli faktörlerdir.

Sıcaklık bitümün davranışını belirleyen en önemli etkenlerden biridir. Yüksek sıcaklıklarda bitümün yumuşaması sonucu, trafiğin de etkisiyle tekerlek izi oluşumu artar. Yapılan çalışmalarda, 50° C’de 100.000 devirde oluşan tekerlek izi oranı ile 60°C’de 10.000 devirdeki tekerlek izi oranının yaklaşık olarak eşit olduğu saptanmıştır (Kutluhan ve Açar, 2009).

Herhangi bir dingil yükünün üstyapıda oluşturduğu bozucu etki sıcaklığa göre çok fazla değişkenlik gösterebilir. Sıcaklık arttıkça, aynı dingil yükü daha büyük bozulmalara neden olur. Bu nedenle, trafik hesabı sonucunda bulunan standart dingil yükü değerlerinin, farklı sıcaklıklar için belirli ağırlık katsayıları kullanılarak dönüştürülmesi ve dolayısıyla eşdeğer hale getirilmesi gerekir (Powell, 2008).

- Yol geometrik parametreleri

Boyuna eğim ve kurb yarıçapı gibi yol geometrik parametreleri, tekerlek izi oluşumunda dolaylı bir etkiye sahiptir. Boyuna eğimin yüksek olduğu yol kesimlerinde özellikle ağır taşıtların hızları düşer. Dolayısıyla yükleme süresinin artması, yolun yüksek eğimli bölgelerinde diğer kısımlarına göre daha fazla tekerlek izi oluşmasına sebep olur.

Küçük yarıçaplı kurbalar için de benzer durum söz konusudur. Bu bölgelerde de taşıt hızları düşük, yükleme süreleri fazladır. Buna ek olarak, küçük yarıçaplı kurbalarda yüzeyde oluşan teğetsel gerilmelerde tekerlek izi oluşumunda oldukça etkilidir (Kutluhan ve Açar, 2009).

3.4.2.2. İç faktörler

- Agregalar

Yol kaplamalarının taşıma gücü ve sıkışabilirliği üzerine etkiyen en önemli faktör agregadır. Bu nedenle agregaların sert ve dayanıklı olması, yabancı madde içermemesi ve tane şekillerinin bir kenetlenme yaparak direnci artıracak şekilde olması istenir. Keskin köşeli malzeme varlığı, hazırlanan karışımın kesme ve iç sürtünme direncini artırmaktadır. Agregaların kırılmış yüzeylerinin fazla olması istenir. Yuvarlak taneli, pürüzlülüğü az,

kırılmamış ve yassı agregaların aşınma tabakalarında kullanılması tekerlek izi dayanımını azaltır (Kutluhan ve Ağar, 2009).

Vanelstraete ve Francken (1995) agrega şekline bağlı olarak, karışımların kalıcı deformasyon davranışlarını dinamik üç eksenli basınç deneyi ile incelemişlerdir. En az kalıcı deformasyon % 100 köşeli agregaların kullanıldığı karışımda olmuştur.

Birçok çalışma, BSK'ların tekerlek izi potansiyeli üzerinde, agrega gradasyonunun, şeklinin ve dokusunun yanında cinsinin de etkisi olduğunu göstermiştir. Farklı cins agregalı karışımlar, aynı gradasyona sahip olsalar bile tekerlek izi potansiyeli yönünden önemli farklılıklar gösterebilirler. Deney sonuçlarından, genel olarak agrega tipi kireçtaşı olan karışımlarda, granite göre daha fazla tekerlek izi oluştuğu gözlenmiştir (Kandhal ve Mallick, 2001).

- Bitüm

Tekerlek izi oluşumuna engel olmak için kaplama mühendisi tarafından alınabilecek ilk önlem, daha sert bitüm seçilmesi olmaktadır. Penetrasyonu düşük, sert bitüm kullanılması, asfalt betonu karışımının stabilitesi ve rijitliğinin artmasını sağlar. Sıcak havalarda kalıcı tekerlek izi oluşmasına karşı kaplamanın direncini artırır.

Yumuşama noktası; yüksek sıcaklıklarda tekerlek izi oluşumunda etkili olan faktörlerin başında gelir. Yumuşama noktası yüksek bitümlerin kullanıldığı karışımlarda, trafik etkisiyle oluşan deformasyonlar daha azdır. Yumuşama noktasındaki 5-6 °C'lik bir azalma % 20 daha fazla tekerlek izine yol açmaktadır (Brosseau vd. 1993).

Karışımındaki bitüm oranı; optimumdan çok fazla ise karışımın stabilitesi ve rijitliği çok düşüktür. Bu durumda, trafik yüklerinin etkisiyle kaplamada derin tekerlek izi oluşur.

- Bitümlü sıcak karışım bileşimi

Boşluk oranı (V), bitüm oranı (V_b), bitümle dolu boşluk yüzdesi (VFA), agregalar arası boşluk oranı (VMA), dane dağılımı indeksi (GI) gibi karışım bileşimini oluşturan elemanlar performansı belirleyen önemli parametrelerdir.

Düşük hava boşluğu oranlarında (%2'den az) agregalar arasındaki boşluk, genel olarak bitüm ile dolmaktadır. Bu durumda, kaplama ağır trafiğe maruz kaldığında, karışım sıvı gibi davranmaya başlamakta ve tekerlek izi oluşumuna direnci azalmaktadır.

İnce gradasyonlu karışımlar için, VFA'nın %85 değerinden sonra, tekerlek izinin önemli derecede arttığı görülmüştür. Benzer bir artış kaba gradasyonlu karışım için %60-70'den sonra başlamaktadır (Archilla ve Madanat, 2001).

- Tasarım ve yapım hataları

Trafik hacminin ve yüklerin gerçeğe yakın olarak öngörülememesi, üstyapı tabaka kalınlıklarının gerekenden az veya fazla olması, diğerine göre zayıf bir ara tabakanın kullanılması tasarım hataları olarak sıralanabilir.

Yapım hataları olarak da, karışımın serilmesinin ve sıkıştırılmasının uygun sıcaklıkta yapılamaması, yeterince sıkıştırılamaması veya aşırı sıkıştırılması, tabakaların tasarımda belirlenen kalınlıklarda serilememesi sayılabilir.

Asfalt beton kaplama kalınlığının gereğinden az yapılması taşıma gücü eksikliğine neden olacağı için, üstyapıda daha fazla deformasyon oluşur. Gereğinden fazla kalın yapılması durumunda ise, daha rijit bir yapıya sahip olacağı için yükleri kendi bünyesinde taşıma eğilimi artar. Bu nedenle, asfalt beton kaplama tabakasında daha fazla tekerlek izi oluşur.

3.4.3. Çatlaklar

3.4.3.1. Timsah sırtı (yorulma) çatlakları

Timsah sırtı veya yorulma çatlakları kaplama yüzeyinde görülen birbiri ile bağlantılı timsah derisini andıran çatlaklar serisidir. Timsah sırtı çatlaklar yük ile ilintili bozulmaya işaret eder çünkü tekrarlı trafik yükleri altında ve sıklıkla temel yada alttemel tabakasının zayıf olması, yetersiz üstyapı kalınlığı, aşırı trafik yükleri, drenaj problemleri veya bu faktörlerin bazılarının birleşimine bağlı olarak, BSK yüzeyindeki yorulmaya bağlı bozulmalardır. Yüksek sıcaklıklarda oluşan tekerlek izinin aksine yorulma çatlakları orta sıcaklıklarda oluşur (Advanced Asphalt Technologies, 2011; Adlinge ve Gupta, 2013; Asphalt Institute, 2007).

Timsah sırtı çatlaklar asfalt beton tabakanın altında, tekerlek yükleri nedeniyle çekme gerilmeleri ve şekil değişimlerinin en yüksek olduğu noktalarda başlar. Çatlaklar, önce tekerlek izine paralel boyuna çatlaklar olarak ortaya çıkar ve kaplama yüzeyine yayılırlar. Tekrarlı trafik yükleri etkisi altında, daha fazla bozulma oluşur ve çatlaklar birbirine bağlanmaya başlar.

Küçük alanlar yama veya alan onarımı ile tamir edilebilir. Daha büyük alanlar yeniden inşayı gerektirir. Her durumda drenaj dikkatlice incelenmelidir.

Kaplamada oluşan bozulma seviyesi düşük, orta ve yüksek olarak üç seviyede incelendiğinde; düşük seviyede, çatlaklar kollara ayrılmış, boyuna ve süreksiz ince çatlaklar halinde olup, birbirleriyle bağlanmaya başlayarak tipik timsah sırtı desenini oluşturmaya başlarlar. Orta bozulma seviyesinde çatlaklar birbirlerine tamamen bağlanmış olup, timsah sırtı deseni tam olarak oluşmuştur. Çatlakların kenarında bir miktar atma görülebilir ve çatlak genişliği 1/4 inch (0,64 cm)'ten fazla olabilir. Yüksek bozulma seviyesinde çatlak deseni tamamen oluşmuş olup, çatlaklarda atmalar olduğu çok açıktır. Münferit gevşemiş parçalar veya yüzeyden malzeme kaybı olabilir (Northwest Pavement Management Association, 1999).

3.4.3.2. Kenar çatlakları

Kaplamanın dış kenarına 30-60 cm mesafedeki boyuna çatlaklar kenar çatlakları olarak isimlendirilir. Bu tip çatlaklar, banketlerden yeterli yanal desteği alamayan zayıf kaplama kenarları boyunca oluşur. Zayıf üstyapı kenarı oluşmasının birkaç sebebi olabilir, bunlar; zayıf temel veya alttemel tabakası, yetersiz drenaj ve donma şişmesidir. Kaplama kenarına yakın ağır trafik ve trafik miktarındaki hızlı büyüme kenar çatlaklarının ilerleyişini hızlandırabilir (Nikolaides, A., 2015; Asphalt Institute, 2007; Hicks vd., 2003).

3.4.3.3. Yansıma çatlakları (Beton derz yansıma çatlakları)

Yansıma çatlakları, mevcut beton kaplama üzerine BSK tabakası serildiğinde, beton kaplamanın derzleri boyunca yeni asfalt beton üstyapıda yayılan çatlaklar ile mevcut bozulmuş asfalt beton yüzey üzerine yeni bir asfalt beton tabaka serildiğinde yeni inşa edilen üstyapıda görülen çatlakları kapsar (Asphalt Institute, 2007; Nikolaides, A., 2015).

3.4.3.4. Blok çatlaklar

Blok çatlaklar, yüzeyi yaklaşık olarak dikdörtgen desenli parçalara ($>0,1 \text{ m}^2$) bölen çatlaklardır. Bu çatlaklar, temel tabakası veya tabii zemindeki hacim değişimleri nedeniyle asfalt beton karışımların büzülmesi neticesinde oluşur. Metre kare olarak ölçülür ve şiddeti çatlak genişliğine göre değerlendirilir. Çatlak genişliği;

- $\leq 6 \text{ mm}$ ise düşük,
- $> 6\text{mm}$ fakat $\leq 19 \text{ mm}$ ise orta,
- $>19 \text{ mm}$ ise yüksek olarak değerlendirilir (Mallick ve Korchi, 2013).

Blok çatlaklar, bazen enine ve boyuna çatlakların kesişmesi neticesinde oluşur. Ayrıca inşaat esnasında yetersiz sıkıştırmadan kaynaklanabilir. Düşük seviyedeki blok çatlaklar ince bir aşınma tabakası yapılarak onarılabilir (Adlinge ve Gupta, 2013).

3.4.3.5. Termal çatlaklar

Kaplamalarda sıcaklık değişiminin tekrarlanması nedeniyle oluşan çatlaklar termal yorulma çatlakları olarak adlandırılırken, kaplamalarda aşırı soğuk nedeniyle aniden oluşan çatlaklar düşük sıcaklık çatlakları olarak adlandırılır. Kaplama sıcaklıklarının genellikle -30°C altına düşmesi durumunda bu çatlaklar görülebilir (Hunter vd., 2015).

- Termal yorulma çatlakları

Termal yorulma çatlakları, gece ile gündüz arasındaki sıcaklık farklarının yüksek olduğu bölgelerde, sıcaklık değişimlerinin tekrarlanması nedeniyle oluşmaktadır. Günlük sıcaklık değişimi tekrarı sebebiyle kaplamada oluşan gerilmeler, geceleri en büyük değere ulaşırken, gündüz saatlerinde bu gerilmeler düşmektedir.

Termal yorulma çatlakları, düşük sıcaklık çatlaklarının olduğu sıcaklıktan daha yüksek sıcaklıkta ortaya çıkmaktadır. Ortaya çıkan gerilme, kaplama dayanımından küçük olduğu için aniden çatlama oluşmamaktadır (Zeng ve Isacsson, 1995; Taşdemir, 2003).

- Düşük ısı çatlakları

Düşük ısı çatlakları soğuk havalarda asfalt beton kaplamanın büzülmesiyle oluşur. Bu tip çatlaklar trafik yüklerinin etkisiyle değil, iklim koşullarının etkisi ile meydana gelmektedir. Büzülen kaplamada çekme gerilmeleri oluşur ve kaplamanın çekme mukavemetini aştığında düşük ısı çatlakları oluşur.

Sıcaklık çok fazla düştüğünde, bitümlü kaplama içerisinde oluşan çekme gerilmeleri düşük sıcaklık çatlaklarının oluşmasına yol açmaktadır. Bitümlü kaplama, soğuk havaya maruz kaldığında büzülme eğilimindedir. Bitümlü kaplama ile altındaki tabaka arasındaki ara yüzeyde oluşan sürtünme bitümlü kaplamanın büzülmesini engellemeye çalışmakta ve bunun sonucunda bitümlü kaplamada çekme gerilmeleri oluşmaktadır (Jung ve Vinson, 1994).

Kaplama içerisinde termal nedenlerle ortaya çıkan çekme gerilmesi, bitümlü karışımın çekme dayanımına ulaştığında, kaplama yüzeyinde çatlaklar ortaya çıkmaktadır.

Sahada yapılan gözlemler, çatlağın birdenbire yüzeyde başladığını ve kaplamanın tabanına kadar indiğini göstermiştir (Jung ve Vinson, 1994).

Bitümlü kaplamada oluşan düşük sıcaklık çatlaklarına, su ve ince parçacıklar girebilmektedir. Kış süresince çatlak içerisinden temel tabakasına nüfuz eden su, temel tabakasının bozulmasına neden olmaktadır. Ayrıca çatlak içerisine giren su donmakta, donan suyun genleşmesi nedeniyle kaplama bozulmaktadır. Bu durum kaplamanın hizmet ömrünü önemli ölçüde azaltmaktadır.

BSK'larda, düşük sıcaklık çatlaklarını etkileyen faktörler; kaplamanın yaşlanması, malzeme, çevresel faktörler, üstyapı faktörleri ve diğer faktörler olarak sıralanabilir.

3.4.3.6. Kayma çatlakları (Slippage crack)

Tabaka kayması çatlamları, taşıtların frenleme veya dönüş yapmaları sonucu oluşan tipik hilal veya yarım ay şeklindeki çatlaklardır. Bu çatlakların nedeni düşük dayanımlı BSK veya yüzey tabakası ile alttaki tabakalar arasındaki bağın zayıflığıdır (Mallick ve El-Korchi, 2013; Asphalt Institute, 2007; Hicks vd., 2003; Nikolaides, A., 2015).

3.4.3.7. Boyuna ve enine çatlaklar

Boyuna çatlaklar, büyük ölçüde yolun merkez hattına paralel olarak ilerleyen ve sıklıkla şeritte kaplama kenarından 3-5 cm mesafede oluşan çatlaklardır. Bu çatlaklar donma şişmesi, derz bozulmaları (kopmaları) veya aşırı yük kaynaklı olabilir. Genellikle, tekniğine uygun yapılmayan temel tabakası inşaatı ve aşırı yükler boyuna çatlakların başlıca nedenleri olarak kabul edilir (Asphalt Institute, 2007; Sun, 2016).

Enine çatlaklar, yolun merkez hattına dik ve genellikle düşük sıcaklıklar, sıcaklık değişimleri veya yansıma çatlaklarının neden olduğu bozulmalardır. Enine çatlaklar, düzgün aralıklı oluşur ve boyuna çatlak oluşum nedenlerinin bazıları ile aynı sebepten kaynaklanır (Sun, 2016; Adlinge ve Gupta, 2013).

3.4.4. Kuma

Terleme veya kuma, asfalt beton kaplamalardaki veya diğer bitümlü üstyapı tabakalarındaki bitümün yukarı doğru hareket ederek yol sathında ince bir bitüm tabakası meydana getirmesidir.

Kuma; asfalt beton kaplamadaki serbest bitümün ısınarak genişmesi ve BSK'daki hava boşluklarında kalamaması neticesinde kaplama yüzeyine doğru taşması olayıdır. Sıcaklık yükseldiğinde BSK'da bitümün hacim değişimlerini karşılayacak yeterli yerin olmaması halinde kuma olayı görülür. Yüksek bitüm içeriğinin yanı sıra kumanın diğer bir nedeni BSK'daki segregasyon nedeniyle aşırı ince agrega varlığıdır. Kusmanın içsel nedeni uygun olmayan karışım tasarımı, kaplama inşaatı; dışsal nedeni ise yüksek sıcaklıktır. Kusmanın sıklıkla sıcak havalarda görülmesinin nedeni bitümün bu ortamda daha az viskoz olmasıdır. Trafik etkileri bitümü yüzeye çıkmaya zorlar (Sun, 2016).

Aşırı bitüm kullanımı ve neticesindeki kuma yolun kayma direncini azalttığından, özellikle yağışlı havalarda taşıtların kayması kolaylaşır. Bu durum trafik güvenliğini azaltır. Kuma geri dönüşümsüzdür. Sıcaklığın düşmesiyle asfalt beton kaplama ilk haline geri gelmez (Sun, 2016).

Kuma, üstyapı tabakalarından herhangi birinde bitüm miktarının çok fazla olması, viskozitesi çok düşük bitüm kullanılması, uygun şekilde yapılmayan örtme tabakası vb. nedenlerden kaynaklanabilir. Normalden ağır trafik yüklerinin yarattığı ilave basınç da düşük boşluklu karışımlarda kumaya sebep olabilir. (Adlinge ve Gupta, 2013; Karayolları Genel Müdürlüğü, 1998).

3.4.5. Sökülme

BSK'lar bitüm ile bağlanmış olarak agrega içerir. Bitüm gerekli kohezyonu ve kaplamanın esnekliğini sağlar. Agrega ise yükü transfer eder ve gerekli kayma direncini sağlar. Asfalt beton kaplamadan agrega danelerinin ayrılması sürecine sökülme denir. Çanak şekilli çukurların oluşumu da dahil olmak üzere şiddetli yüzey bozulmalarına neden

olabilir. Sökülme bağlamında agregalar arasında %20'den fazla boşluk içeren poroz asfalt betonuna yönelik çalışılmaktadır (Opara vd., 2016; Nikolaidis, A., 2015).

Sökülme, kohezyon eksikliğinden kaynaklanabileceği gibi adezyon eksikliğinden de kaynaklanabilir. Kohezyon eksikliği bitümün kendisinde meydana gelmektedir. Adezyon eksikliği ise; kaplamanın eğilmesi ve ısısal büzülmenin birlikte etkisi ile oluşan çekme şekil değişimlerinden kaynaklanır (Opara vd., 2016).

Sökülme zayıf sıkıştırma ve bunun neticesinde düşük yoğunluk ve nisbeten yüksek boşluk ile beraber suyun kaplama yüzeyinde yolunu bulması nedeniyle oluşur (Mallick ve Korchi, 2013).

3.4.6. Cilalanmış agrega

Cilalanmış agrega, bitüm ve ince agreganın asfalt beton kaplama yüzeyinden sökülmesiyle kaba agreganın dış etkilere maruz kalması neticesinde oluşur. Metre kare olarak ölçülür (Mallick ve Korchi, 2013).

Yol yüzeyindeki agrega daneleri cilalandığı zaman, asfalt beton kaplamanın kayma direnci azalmakta ve bu nedenle güvenlik sorunları oluşmaktadır. Agreganın cilalanmasının başlıca sebepleri; düşük sertlik ve zayıf aşınma dayanımıdır. Kaliteli agrega malzemesi kullanılmak suretiyle agrega cilalanması önlenir (Sun, 2016).

3.4.7. Ondülasyon (Corrugation)

Ondülasyonlar, asfalt beton kaplama yüzeyinde yanlamasına oluşan hafif dalgalanmalardır. Trafiğin başladığı ve durduğu veya tepelerde yokuş aşağı inen taşıtların frenleme yaptığı bölgelerde BSK'da stabilite eksikliği nedeniyle oluşurlar. Stabilite eksikliğinin nedenleri; çok fazla veya çok yumuşak bitüm, yüksek kum içeriği (2mm altı taneler) ve pürüzsüz, yuvarlak agregaların karışımında oranlarının fazla olmasıdır (Hicks vd., 2003; Asphalt Institute, 2007; Mallick ve Korchi, 2013).

3.4.8. Çanak şekilli çukur (Pothole)

Kaplama yüzeyinde oluşan ve minimum boyutu 150 mm olan çanak şeklindeki çukurlardır. Bu çukurların oluşmasının başlıca 4 nedeni vardır;

- Kışın ve ilkbaharda oluşan donma çözülme olayları ile birlikte kaplama kalınlığının oluşan trafiği karşılamakta yetersiz kalması,
- Fazla suyun birikmesine neden olan yetersiz drenaj,
- Yardımcı hendeklerin bozulması,
- İnşaat hataları ve kapatılmamış çatlaklar (Sun, 2016; Mallick ve Korchi, 2013; Nikolaides, A., 2015).

3.4.9. Çökme

Çökmeler, küçük, bölgesel, çanak şekilli ve çatlak da içerebilen alanlardır. Çökmeler pürüzlülüğe ve su toplanmasına neden olduğu gibi motosiklet sürücüleri için tehlike oluşturur.

Çökmeler; bölgesel konsolidasyon veya yüzey tabakasının altında onu destekleyen tabakaların stabilite yetersizliği nedeniyle hareketi neticesinde oluşur (Adlinge ve Gupta, 2013).

3.4.10. Şişme

Şişme, kaplama yüzeyinde bölgesel yukarıya doğru kabarıklıklardır. Yüzey tabakasını destekleyen alttaki tabakaların veya tabii zeminin genişmesi neticesinde oluşur. Genleşmenin sebebi don şişmesi veya nem'dir. Yüksek oranda plastik kil içeren tabii zeminler don şişmesine benzer bir şekilde şişebilir (Özellikle sıcak aylarda) (Adlinge ve Gupta, 2013).

3.5. Bitümlü Sıcak Karışımlara Uygulanan Deneyler

Genel olarak BSK'lara uygulanan laboratuvar deneyleri üç grup altında incelenebilir (Hunter vd., 2015).

- Temel deneyler

Statik sünme deneyi, Tekrarlı yük deneyi, dinamik rijitlik ve yorulma deneyleri

- Simülatif (Benzetici) deneyler

Tekerlek izi deneyleri, Yoğurmalı sıkıştırma, Durabilite, Çatlama

- Ampirik

Marshall, İndirekt çekme dayanımı

3.5.1. Statik ve dinamik sünme deneyi (EN 12697-25, AASHTO T 245, ASTM D6927 ve D5581)

Tekrarlı ve sabit yükler etkisi altında asfalt betonu içinde meydana gelen kalıcı deformasyonların ölçülmesi için yapılan deneylerdir. Statik ve dinamik sünme olmak üzere iki çeşit sünme deneyi vardır. Statik sünme deneyinde; deney süresince numuneye sabit bir eksenel yük uygulanır. Dinamik sünme deneyinde ise; numuneye çok sayıda eksenel tekrarlı yük uygulanır. Deneyin dinamik olarak adlandırılmasının sebebi; deney süresince numune üzerindeki yükün uygulanması-yükün kaldırılması işleminin sürekli olarak devam etmesidir (Asphalt Institute, 2007).

Statik sünme deneyinde; istenen eksenel gerilme değerine (genellikle 69 ve 207 kPa) ulaşıncaya kadar eksenel yük uygulanır. Bu eksenel gerilme numunede toplam eksenel şekil değişimi %2'ye ulaşıncaya kadar veya üçüncü aşamada akma oluşuncaya kadar korunur.

Deney prosedürü, 100 mm çapındaki numuneye 10 000 s boyunca sabit sıcaklıkta 500 kPa'a varan eksenel sabit yük uygulanmasını içerir. Ancak deney asfalt beton kaplamaların hizmet ömrü boyunca maruz kaldığı dinamik trafik yükleme koşullarını temsil etmede yetersiz kalmaktadır. Bu yöntemle yapılan teker izi derinliği tahminlerinin sahada yapılan deneme uygulamalarında ölçülen teker izi derinliklerine kıyasla daha az olduğu tespit edilmiştir.

Deney esnasında herhangi bir anda uygulanan gerilme, ölçülen şekil değişimine bölünmek suretiyle sünme modülü veya rijitliği elde edilir. Çünkü şekil değişimi zamanla değiştiği gibi sünme modülü de zamanla değişmektedir (Asphalt Institute, 2007).

Tekrarlı yükleme gerçek trafik yüklerini temsil etmeye daha yakındır. Dinamik sünme deneyinde belirlenen bir eksenel gerilme (genellikle 69-207 kPa) numuneye 0,1 saniye süresince uygulanır, sonrasında yük kaldırılarak 0,9 saniye süre ile numune dinlenmeye bırakılır. Her yükleme periyodu 1 saniyedir. Standart deneyde, 10000 yükleme (yaklaşık 2,75 saat) veya numunede üçüncü aşamada aşırı deformasyon oluşuncaya kadar devam edilir.

Yükleme süresince (t), BSK deforme olur; deformasyon (δ_l) ve şekil değişimi (ϵ) başlangıçta hızlı bir şekilde yükselir. Uygulanan gerilme kaldırıldıktan sonra (dinlenme periyodu), toplam deformasyonun bir kısmı aniden geri gelir (elastik deformasyon). Bir kısmı ise zamana bağlı olarak iyileşir (viskoelastik deformasyon), deformasyonun bir kısmı ise iyileşmez. (viskoz/plastik veya kalıcı deformasyon) Tekrarlı yükleme durumunda, geri dönüşümsüz deformasyonların toplamı, asfalt beton kaplamadaki kalıcı deformasyonlar olup, tekerlek izi olarak kendini belli eder (Nikolaides, 2015).

Deney düzeneğinde numunelerin çeşitli sıcaklıklarda muhafaza edilmesini sağlayan iklimlendirme kabini mevcuttur. Söz konusu kabin $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ile $+70\text{ }^{\circ}\text{C}$ arasında istenilen deney sıcaklığını sağlayabilmelidir. Sünme deney cihazı Şekil 3.14’de gösterilmiştir.

Sünme deneyinde 24 saat öncesinden numuneler iklimlendirme kabinine yerleştirilir. Bu şekilde numunelerin bütün bölgelerinin istenilen deney sıcaklığına ulaşması sağlanmış olur.



Şekil 3.14. (a) Sünme cihazı, komprasör ve bilgisayar (b) Yükleme çerçevesi

BSK'ların kalıcı deformasyonlarının tayininde EN/DIN 12697-25 standardından yararlanılmakta olup, bu standartta iki farklı yöntem tarif edilmektedir. İlk yöntemde BSK'ların sünme karakteristiklerinin tayininde tek eksenli tekrarlı yükleme deneyi kullanılmaktadır. İkinci yöntemde ise, bu amaçla üç eksenli tekrarlı yükleme deneyinden yararlanılmaktadır. Her iki deney de $\geq 40^{\circ}\text{C}$ gibi yükseltilmiş sıcaklıklarda (genellikle 40, 45 veya 60°C) uygulanmaktadır (Nikolaides, 2015).

3.5.2. İndirekt çekme dayanımı (ITS) deneyi (EN 12697-23, AASHTO T 322, ASTM D6931)

ITS deney cihazı ile orta ve yüksek ısılarda indirekt çekme yüklemesi ile asfalt beton karışımların sünme davranışı ve çekme mukavemetleri ölçülebilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi deney numunesine dikey basınç kuvveti uygulanarak enine (yanal) çekme gerilmesi elde edilir (Tunç, 2007).

$$\text{İndirekt Çekme Dayanımı (ITS)} = \frac{2P}{\pi dt} \quad (3.12)$$

Burada;

P : yük (kN),

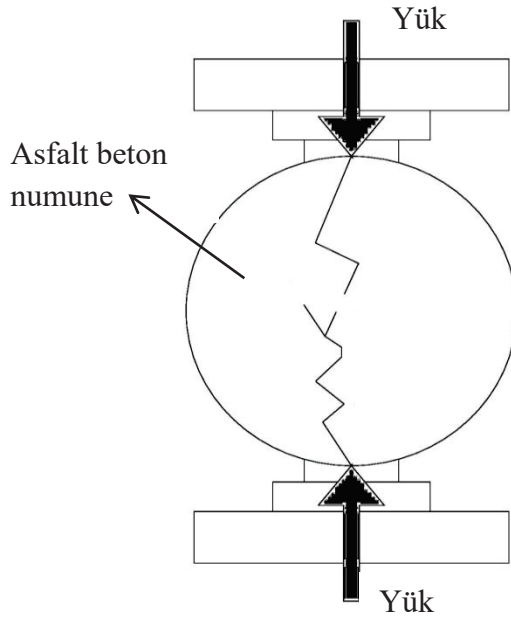
d : çap (mm),

t : numune yüksekliğini (mm) ifade eder.

Bu deney sonucunda bulunan ITS değeri ve bozulma deformasyonu, BSK'ların yorulma çatlaklarının oluşma potansiyeli ve karışımın optimum bitüm içeriğinin belirlenmesinde kullanılır (İSFALT, 2001).

Deney numuneleri Marshall tasarımına uygun olarak üretilir. Yük, deformasyon oranı 50,8 mm/dakika olacak şekilde uygulanır. Deney sırasında numuneye uygulanan yük ile yatay ve düşey doğrultuda oluşan deformasyonlar yükleme zamanının tamamında kaydedilir. ITS deneyinde numune yerleşimi Şekil 3.15'de gösterilmiştir.

Çekme dayanımı esasen bitüm özelliklerinin fonksiyonudur. BSK'daki bitüm oranı ve onun rijitliği çekme dayanımını etkiler. Çekme dayanımı ayrıca kullanılan agregaların absorpsiyon kapasitesine bağlıdır. Herhangi bir bitüm oranında; agrega yüzeyindeki bitüm film tabaka kalınlığı ve taneler arasındaki temas, adezyonu veya karışımın çekme dayanımını etkiler (Khosla ve Harikrishnan, 2007).



Şekil 3.15. ITS deneyinde numune yerleşimi

Yapılan çalışmalar, azalan hava boşluğunun çekme dayanımında artışa neden olduğunu göstermiştir. Karışımın çekme dayanımı, tekerlek izini de etkileyebilen bitümün kıvam özelliğinden önemli ölçüde etkilenmektedir. Böylece, çekme dayanımı Superpave karışımların tasarım ve değerlendirilmesinde önemli rol oynamaktadır.

BSK’larda nem hasarı önemli bir problemdir. Nem varlığı asfalt beton karışımın rijitliğinin azalmasına neden olduğu gibi, bitümün agregadan soyulmasına da neden olabilir. Bu duruma tekrarlı trafik yükleri de eklendiğinde, esnek kaplamalardaki bozulmalar hızlanabilir. Dayanım kaybı, şartlandırılmamış normal numuneler ile şartlandırılan numunelerin indirekt çekme dayanımlarının karşılaştırılması ile değerlendirilir. Şartlandırılmış numunelerin ortalama nihai dayanımı; normal numunelerin dayanımının % 85’inden az ise, karışımın nem hassasiyeti olduğu kabul edilir (Khosla ve Harikrishnan, 2007).

Örneğin; A ve B olmak üzere iki farklı karışım için çekme dayanım değerleri verilmiştir.

Karışım	Çekme dayanımı (psi)		TSR (%)
	Şartlandırılmamış	Şartlandırılmış	
A	200	156	78
B	100	84	84

A ve B karışımları için çekme dayanım oranları (TSR) sırasıyla %78 ve %84’tür. Her iki karışım da TSR için minimum %85 kriterini karşılamasa da, karışım A için şartlandırılmış çekme dayanımı, karışım B için şartlandırılmamış çekme dayanımından %56 fazladır. Bu yüzden, BSK olarak A karışımını seçmek B karışımını seçmek kadar zararlı olmayacaktır (Khosla ve Harikrishnan, 2007).

Çekme dayanımı performans değerlendirmesinde dikkate alınması gereken kritik parametrelerden biridir. BSK’nın yorulma ömrünün değerlendirilmesi eğilme rijitliği ölçümlerine dayanır.

Asfalt beton kaplamanın altındaki çekme şekil değişimleri karışımın yorulma ömrünün belirlenmesinde önemli bir parametredir. Asfalt beton tabakanın altı en büyük çekme gerilme ve şekil değişimine maruz kalır. Çatlaklar bu tabakanın altında başlar ve tekrarlı yükler etkisiyle ilerler. Sonuçta, çatlak tekerlek izleri boyunca yüzeyde görünür, birbiriyle kesişmeyen çatlaklar serisi halini alır. Bu çatlaklara timsah sırtı veya aşağıdan yukarı yorulma çatlakları denir (Khosla ve Harikrishnan, 2007).

Nem BSK'ları üç yolla etkiler; kohezyon kaybı, adezyon kaybı ve agrega ayrışması. Adezyon ve kohezyon kaybı soyulma olayı için önemlidir. Kohezyondaki bir azalma dayanım ve rijitlikte azalma ile sonuçlanır. Adezyon kaybı ise bitüm ve agreganın fiziksel olarak ayrılması anlamına gelir ve bu duruma esasen nem sebep olur (Khosla ve Harikrishnan, 2007).

3.5.3. İndirekt çekme rijitlik modülü (ITSM) deneyi (EN 12697-26, AASHTO T 322, ASTM D6931)

ITSM deneyi, dinamik yükler altındaki BSK'ların rijitliğini (sertliğini) tespit etmek amacıyla yapılmaktadır. Rijitlik modülü, asfalt beton kaplamalarda yük dağıtma kabiliyetinin bir ölçüsüdür ve asfalt beton kaplamaların en önemli performans özelliği olarak kabul edilir. Rijitlik modülü, trafik etkisiyle kaplamanın altında meydana gelen ve yorulma çatlaklarına neden olan çekme ve basınç gerilmelerinin neden olduğu kalıcı deformasyonları kontrol eder. Tek eksenli yükleme altında elde edilen rijitlik modülü genel olarak maksimum gerilmenin maksimum birim şekil değiştirmeye oranı olarak alınır.

ITSM deneyi numuneye zarar vermeyen bir deneydir. Bu deneyde; operatör hedef yatay deformasyonu ve yükün uygulanmasından itibaren pik yüke ulaşıncaya kadar geçecek süreyi (hedef yük vuruş süresi) seçer. Karışımın tahmini poisson oranı ve hedef deformasyon bilgisayara veri olarak girilir. Numuneye uygulanan yük bilgisayar tarafından otomatik olarak hesaplanır. Numunenin enkesit alanı bilindiği ve uygulanan yük ölçülebildiği için, uygulanan gerilme de hesaplanabilir. Ayrıca numunenin çapı önceden bilindiği için şekil değişimleri de hesaplanabilir. Böylelikle, gerilme ve şekil değişimi bilineceğinden, malzemenin rijitlik modülü de hesaplanabilecektir.

$$S_m = \frac{L * (v + 0.27)}{D * t} \quad (3.13)$$

Burada;

- S_m : Rijitlik modülü (MPa),
 L : Uygulanan düşey yükün en büyük değeri (N),
 D : Yatay deformasyonun ortalama değeri (mm),
 t : Deney numunesinin ortalama kalınlığı (mm),
 ν : Poisson oranını (0,35 alınabilir) ifade eder.

İndirekt çekme rijitlik modülü deneyi için standart deney koşulları ve gereklilikleri;

- En az 5 μ m hedef yatay deformasyon,
- Yükselme süresi 124 ms – 1,33 Hz. frekansa denk
- 80, 100, 120, 150 veya 200 mm numune çapları

4. MODİFİYE ASFALT

Esnek üstyapılardaki artan trafik yüklerinin etkisiyle son yıllarda normal penetrasyon sınıfı bitümlere kıyasla gelişmiş performans gösterecek bitümlerin araştırılmasına yönelik çalışmalar hız kazanmıştır. Gelişmiş özellikte bitüm elde edilmesine yönelik bu çabalar, normal bitümün ve yoldaki asfalt betonun performansını geliştirecek çok çeşitli bitüm modifiye edicilerin değerlendirilmesi, geliştirilmesi ve kullanılmasına yol açmıştır.

İyi tasarım, kademeli inşaat ve zamanında yapılan bakım ile asfalt beton yollar kendilerinden beklenen performansı göstermekle kalmaz, aynı zamanda yüksek standartlarda güvenlik ve konfor sağlar. Bununla beraber, yolun belirli bölgeleri diğer bölgelere nazaran daha fazla yüke maruz kalabilir. Bu sebeple; hizmet ömrü boyunca yolun tamamının beklenen performansı göstermesi isteniyorsa, yolun bu bölgelerinde tasarıma ayrıca dikkat edilmelidir. Bazı yapılarda özel malzemeler kullanımı sağlanmalıdır. Bu halde bile tasarıma yönelik gözden kaçan durumlar olabilmektedir (Hunter vd. 2015).

4.1. Katkı Kullanma Nedenleri ve Modifikasyon

Modifikasyon işlemi, bitümün ve/veya karışımın performansını artırmak amacıyla modifiye edici katkıların belirli oranlarda ve şartlarda bitüm içerisine yada karışım plentinde bitümlü karışım içerisine katılmasıyla yapılır. Bu şekilde elde edilen bitüme “Modifiye Bitüm” ve karışıma ise “Modifiye karışım” denir (Tunç, 2007).

Modifiye bitüm kullanılmasının asıl nedeni karışımın tekerlek izi oluşumuna karşı direncini artırmaktır. İkincil nedenler ise; termal çatlaklara karşı direnci artırmak ve karışımın durabilitesini artırmaktır.

Asfalt beton karışımların kullanıldığı sıcaklık aralığının artırılarak herhangi bir bozulma olmadan kullanılabilmesi, bitüm ile agrega arasındaki bağın iyileştirilebilmesi için genellikle polimerlerden yararlanılmaktadır (Mallick ve Korchi, 2013).

Bitüme katkı ilave edildiğinde, elde edilecek modifiye bitümün özellikleri çeşitli faktörlere bağlıdır:

- Katkı özellikleri,
- Bitüm özellikleri,
- Karıştırma koşulları,
- Katkının bitüm ile uyumluluğu (Becker vd. 2001)

Esnek kaplamanın hizmet ömrünü uzatmak ve erken görülebilecek bozulmaların önüne geçebilmek için modifiye bitüm kullanımına yönelik bir eğilim olsa da, ilk inşaat maliyetleri daha yüksek olduğundan bütün asfalt beton üstyapıların modifiye asfalt karışımlar kullanılarak inşa edilmesine gerek yoktur. Her proje, çevresel koşullar, trafik yükleri, beklenen hizmet ömrü ve performans açısından modifiye bitüm kullanımına gerek olup olmadığı hususunda değerlendirilmelidir (Asphalt Institute, 2007).

Gerek dünyada, gerekse ülkemizde performans artırıcı özellik taşıyan ve doğrudan bitüme ya da bitümlü karışımlara ilave edilen çok sayıda katkı maddesi bulunmaktadır. Geniş ve değişik bir ürün yelpazesine sahip olan modifiye katkı maddelerinin ortak olumsuz yönü ise bir yandan karışımın özelliklerini iyileştirirken, diğer yandan maliyeti artırmalarıdır. Bazı endüstriyel yan ürün ve atıklar, depolama maliyetlerinden tasarruf amacıyla, bitümlü karışımlara ilave edilmektedir. Karışım maliyetlerini azaltmalarına karşın, bu atıkların karışım özelliklerinin iyileştirilmesine yönelik herhangi belirgin bir etkileri olmayabilir. Bu tür atık maddelerin karışım özelliklerini olumsuz yönde etkilemesi ve bazı özellikleri şartname sınırlarının dışına çıkarması bile söz konusu olabilmektedir. Bu bağlamda, en ideal katkı maddeleri, karışıma ilave edildiğinde, bitüm rolü üstlenerek, kısmen bitümün yerini alan, karışım performans özelliklerini de belirli ölçüde iyileştiren ve karışım maliyetini düşüren maddelerdir (Deniz, 2009).

Bitüm modifikasyonunda, modifiye bitüme çeşitli testler uygulanarak bitüm özelliklerindeki değişim veya iyileşme belirlenerek değerlendirilmesi yapılmaktadır. Ancak bitümün modifiye edilmesi yönteminde özelliklerinin tespiti, taşınması ve depolanması gibi sorunlar söz konusu olmaktadır. Karışım modifikasyonunda ise, katkı maddesi için ek karıştırma ekipmanı, taşıma ve depolama gibi sorunlarla beraber karışımdan modifiye bitümü çekerek özelliklerinin tayin edilmesi ve değerlendirilmesi

mümkün olmamaktadır. Ayrıca, bitüm özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan deney yöntemleri, karışım özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan deney yöntemlerine göre daha kısa sürede ve daha sağlıklı yapılabildiğinden, bitümün modifiye edilmesi yöntemi değerlendirme ve kullanım bakımından ön plana çıkmaktadır.

Bitüm ve bitümlü karışımların modifiye edilmeleri ile, yol kaplamalarının yüksek sıcaklıklarda yeterli rijitliğe sahip olarak kalıcı deformasyonlara karşı dirençli olması, düşük hava sıcaklıklarında da yeterli esnekliğe sahip olarak çatlamalara ve kırılmalara karşı dirençli olmaları amaçlanmaktadır. Ayrıca kaplamanın, yüksek trafik yükleri altında yorulma nedeniyle oluşan çatlamlar ile su etkisiyle meydana gelen soyulmalara karşı dirençli olması ve kaplama yüzeyinde istenen düzeyde kayma direncinin elde edilerek sürüş emniyetinin artırılması da amaçlanmaktadır. Genel anlamda bitümün modifiye edilme sebepleri aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Düşük hizmet sıcaklıklarında daha esnek karışımlar elde ederek çatlakları azaltmak,
- Yüksek sıcaklıklarda daha rijit karışımlar elde ederek tekerlek izlerini azaltmak,
- Kayma direnci yüksek kaplama yüzeyleri elde etmek,
- Karışımların stabilitesini, mukavemetini ve yorulma direncini artırmak,
- Karışımın işlenebilirliğini ve sıkışmasını geliştirmek,
- Düşük kaliteli agregaları kullanılır hale getirebilmek,
- Düşük kaliteli bitümlerin verimini artırmak,
- Agregası ve bitüm arasındaki adezyon kuvvetini artırarak soyulmayı azaltmak,
- Kusmayı (terleme) azaltmak,
- Yaşlanmaya karşı bitümün direncini arttırmak,
- Daha ince kaplama tabakası yapılmasını mümkün kılmak,
- Yansıma çatlaklarını geciktirmek,
- Kaplamanın her bakımdan performansını yükseltmek,
- Kaplamanın uzun vadede ekonomik olmasını sağlamak (Lewandowski, 1994).

Modifikasyonda kullanılacak katkı maddelerinin ve modifiye bitümlerin uygulamada etkili, uygun ve ekonomik olması bakımından sağlanması gereken koşullar;

- Kolay elde edilebilmelidirler,

- Asfalt beton karışım sıcaklığında özelliklerini kaybetmemelidir,
- Bitümle homojen olarak karışabilmelidir,
- Asfalt betonu yüksek karıştırma ve serme sıcaklıklarında, çok fazla viskoz hale getirmeden, yüksek yol sıcaklıklarında akışkanlığa karşı dirençlerini arttırmalıdır.
- Düşük sıcaklıklarda asfalt betonun çok kırılma veya sert olmamasını sağlamalıdır.
- Maliyetleri ekonomik olmalıdır (İSFALT, 2001; Hunter vd. 2015).

Modifikatörlerin başlıca görevlerinden biri, bitümün veya BSK'nın yüksek sıcaklıklar altında kalıcı deformasyona karşı direncini, diğer sıcaklıklardaki bitüm veya karışım özelliklerini olumsuz etkilemeksizin arttırmaktır. Bu işlem, karışımın toplam viskoelastik tepkisi ve kalıcı şekil değişimlerinin azaltılması amacıyla yapılır. Bunun için bitümün elastik bileşeni artırılır, viskoz bileşeni azaltılır. Bitümün sertliğinin artırılması karışımın da sertliğini artırır. Dolayısıyla malzemenin yük yayma yeteneği ile kaplamanın mukavemeti ve beklenen hizmet ömrü iyileşecektir.

Aynı etki kaplama tabaka kalınlıklarının artırılması ile de elde edilebilir ancak bu durum ilk yapım maliyetinin yüksek olmasına neden olur. Bitümün modifiyesi ile daha ince bir tabaka oluşturarak kaplamanın mukavemetini arttırmak mümkündür.

Karayollarımızda iklim ve trafik şartları altında meydana gelen bozulmaları geciktirerek, bakım ve yenilemenin daha seyrek aralıklarla yapılabilmesine imkân sağlayabileceği düşünülen “modifiye bitüm” konusu, petrolde dışa bağımlı olan ülkemiz için çok önemli bir hale gelmektedir. Bu amaçla ülkemizde birçok çalışma yapılmaya başlanmış ve KGM tarafından “Modifiye Bitüm Teknik Şartnamesi” hazırlanarak yayımlanmıştır.

Bitüme polimer ilavesi genellikle bitümün yüksek sıcaklık sınıfını artırmaktadır. Ancak, polimerin cinsine bağlı olarak, düşük sıcaklık sınıfı artabilir veya azalabilir. Polimer modifiye bitümler; kalıcı deformasyon, ısısal çatlak, yorulma çatlak ve nem hasarı direncini iyileştirebilir. En yüksek ve en düşük kaplama sıcaklıkları arasındaki farkın 92°C'ye kadar olması halinde saf bitüm yeterli performansı gösterebilmektedir. Ancak 92°C sıcaklık aralığının dışında kalınan durumlarda bitümü modifiye etme ihtiyacı

doğmaktadır. PG 72-28 sınıfı için nümerik fark 100'dür. Bu sınıfı sağlayacak bitüm muhtemelen polimer modifiye olmalıdır (Hicks vd, 2003; Tam, 2006).

4.2. Modifiye Edici ve Katkı Tipleri

Modifiye bitümler genellikle “Polimer Modifiye Bitüm”- PMB olarak bilinir. Modifiye bitüm polimer ve kimyasal modifikasyon dahil birkaç yolla üretilebilir. Ancak en yaygın olanı polimer modifikasyonudur (Asphalt Institute, 2007).

Polimerler, uzun moleküler zincirler oluşturmak için kimyasal olarak birbirine bağlanan daha küçük moleküller veya monomerlerden oluşur. Polimerlerin isimleri, o polimeri yapmak için kullanılan monomerlerin isimleri baz alınarak belirlenir.

Polimerler fiziksel özellikleri esas alınarak sınıflandırılabilir. Yeterli kuvvetle gerildiklerinde davranışları esas alınarak polimerler; plastomerler (plastikler) veya elastomerler (lastikler ve elastikler) olarak sınıflandırılabilir. Gerilmeye maruz bırakıldıklarında, plastomerler esner ancak yük kaldırıldığında gerildikleri konumda kalırlar. Elastomerler ise yük altında esnerler fakat yük kaldırıldığında orijinal şekillerine geri dönerler (Asphalt Institute, 2007). Bitüm modifikasyon çeşitleri Çizelge 4.1’ de verilmiştir.

Plastomerler, polietilen ve etilen kopolimeri içerirler ve esasen sıcaklık duyarlılığını azaltmak veya çekme dayanımını artırmak amacıyla kullanılırlar. Bitüm modifiyesinde kullanılan başlıca plastomerler; Polietilen (PE), Polipropilen (PP), Etilen Vinil Asetat (EVA), Etilen Bütil Akrilat (EBA) ve Etilen Metakrilat (EMA)’dır. Plastomerler, daha az elastik bileşen içerdiklerinden, yük altında erken dönem dayanımı yüksek BSK’lar oluştururlar. Ancak, tekerlek izi ve çatlak oluşumu gibi bozulmalar daha çok görülebilir. EVA asfalt beton karışımların işlenebilirliğini ve dayanımını modifiye etmek için kullanılır (Xie ve Shi, 2014).

Çizelge 4.1. Bitüm modifikasyon çeşitleri (İSFALT, 2001; Hunter vd. 2015)

		Örnekler
Polimer olmayan katkı ile modifikasyon	Fillerler	Kil, Siyah karbon, Uçucu kül
	Soyulma Önleyici Katkılar	Organik aminler ve amidler
	Genleştiriciler (Ekstenderler)	Ligrin, Sülfür
	Antioksidanlar	Çinko ve kurşun antioksidanları, Fenolikler, Aminler
	Organo-Metal bileşimleri	Organo mangan ve organo kobalt bileşimleri
	Diğerleri	Organo karbon bileşimleri, Gilsonit, Silikon, İnorganik fiberler
Polimer katkı ile modifikasyon	1. Plastikler	
	Termoplastikler	Polietilen (PE), Polipropilen (PP), Polivinil Klorid (PVC), Polistiren (PS), Etilen Vinil Asetat (EVA)
	Termosetler	Epoksi Reçineler
	2. Elastomerler	
	Doğal Kauçuklar	
	Yapay Elastomerler	Sentetik Butadien Kopolimer (SBR), Stiren Butadien Stiren Kopolimer (SBS), Etilen Prokplendien Harmoliper (EPDM), İsobüten İsopren Kopolimer (IIR)
	3. İşlenmiş Kauçuklar	
	4. Fiberler	Polyester, Fiberler, Polipropen Fiberler
	Kimyasal Reaksiyon Modifikasyonu	Katkı Reaksiyonu (bitüm+monomer), Volkanizasyon (bitüm+sülfür), Nitrosyon reaksiyonu (bitüm+nitrik asit)

Polimer veya elastomer, modifiye katkılarının en önemli etkisi bitümün rijitliği ve sıcaklık duyarlılığı üzerinde olmaktadır. Pek çok malzeme ile kıyaslandığında, bitüm viskozitesi veya rijitliği büyük ölçüde sıcaklığa bağlıdır. Bitümü pek çok uygulama için ideal bir bağlayıcı yapan bu özelliğidir (Green, 1998).

Bitüm modifiyesinde kullanılan başlıca elastomerler; Stiren Bütadien Stiren (SBS), Stiren Bütadien Kauçuk (SBR), Stiren Etilen/Bütillen Stiren (SEBS) ve Stiren İsopren Stiren (SIS)'dir.

Bitümün sıcaklık duyarlılığını azaltmak, büyük şekil değişimlerinde çekme dayanımını artırmak, kohezyon ve adezyonu iyileştirmek amacıyla kullanılan elastomere blok kopolimeri, doğal ve sentetik lateks örnek olarak verilebilir. Stiren bütadien kauçuk

(SBR) asfalt beton karışımların yüksek sıcaklıklardaki tekerlek izi potansiyelini azaltmak için kullanılmaktadır (Mallick ve Korchi, 2013).

Polimerler sıvı bitüm ile önceden karıştırılabildiği gibi, plentte BSK hazırlanması esnasında da eklenebilir. Polimer modifiye bitümler fiziksel karıştırma veya reaktif kullanımı ile üretilebilir. Burada önemli olan faktörler; reaktif, bitüm ve polimer dozajı, yüksek kesme kuvvetine sahip karıştırıcı kullanımı ve uygun depolamadır. Karıştırma süreci için kritik parametreler; zaman, sıcaklık, hız ve karıştırma sisteminin kesme kuvvetidir (Mallick ve Korchi, 2013).

4.3. Çeşitli Polimerlerin Avantaj ve Dezavantajları

Bitüm modifiyesinde polimer kullanımının avantajlarının yanında dezavantajları da olabilir. Bunlar; yüksek maliyetler, bazı polimer modifiye bitümlerin yüksek sıcaklık hassasiyeti, düşük yaşlanma direnci, düşük depolama stabilitesi ve elastisitede sınırlı iyileşmedir. Bitüm oksidasyonu ve polimer bozulması gibi faktörlerin ortaklaşa etkisi neticesinde PMB'lerin yaşlanmaya daha meyilli olduğu görülmektedir. Bazı PMB'lerin düşük depolama stabilitesi; polimer ve bitümün yoğunluk, moleküler ağırlık, polarite (kutupsallık veya $\pm$ yük dağılımı), polimerin bitüm içerisinde tam olarak çözünmemesi, polimer ve bitüm arasındaki zayıf uyumluluktan kaynaklanmaktadır. Bitüm modifiyesinde yaygın olarak kullanılan polimerlerin avantaj ve dezavantajları Çizelge 4.2' de verilmiştir (Xie ve Shi, 2014; Zhu vd., 2014).

Çizelge 4.2. Bitüm modifiyesinde yaygın olarak kullanılan polimerlerin avantaj ve dezavantajları (Xie ve Shi, 2014)

Polimer Tipi	Ürün	Avantajlar	Dezavantajlar
Plastomerler	PE	Yüksek sıcaklık performansı ve yaşlanma direncinde iyileşmeler, yüksek modül, nisbeten düşük maliyetler	Kısıtlı stabilite ve elastisite iyileşmeleri, bitüm içinde zor dağılım, faz aglomerasyon problemi
	PP	Viskozitede az artış, daha düşük penetrasyon ve iyileştirilmiş yük direnci	Düşük termal çatlak direnci, düşük yorulma çatlak direnci, elastisite ve mekanik özelliklerde düşük iyileşme
	EVA EMA	Nisbeten iyi depolama stabilitesi ve tekerlek izi direnci, bitüm ile iyi uyumluluk, minimal viskozite değişimleri, termal olarak stabil, nisbeten düşük maliyet	Elastik iyileşmede düşük artış, düşük sıcaklık özelliklerinde kısıtlı iyileşme
	EBA	Nisbeten yüksek tekerlek izi direnci	Kısıtlı elastik iyileşme artışı, düşük sıcaklık özelliklerinde kısıtlı iyileşme
Elastomerler	SBS SBR	Düşük sıcaklıklarda yüksek esneklik, rijitlik ve elastik tepkide iyileşme, tekerlek izi direncinde iyileşme	Bitüm ile uyumluluk sorunu (Vulkanizasyon olmadan yüksek oranlarda kullanıldığında), düşük yaşlanma direnci, nisbeten yüksek maliyetler
	SIS	Düşük sıcaklık hassasiyeti, tekerlek izi direncinde iyileşme	Nisbeten yüksek maliyet, ısı ve oksidasyona düşük direnç
	SEBS	Isı, oksidasyon ve ultraviyole bozulmaya karşı yüksek direnç	Düşük depolama stabilitesi, düşük elastisite, yüksek maliyet
Kauçuklar	Doğal Kauçuk	Nisbeten yüksek düktilite ve elastisite, periyodik yükler altında iyi özellikler, tekerlek izi direncinde iyileşme	Bozulma (dekompozisyon) ve oksijen absorpsiyonuna açık, bitüm ile az uyumluluk, mekanik olarak homojenize edilme zorunluluğu
	Kazanılmış Oto Lastiği Kauçuk	Düşük bakım maliyetleri, düşük yansıma çatlağı, yorulma ve tekerlek izi direnci ile durabilitede iyileşme	Çözünmesi ve dağılması zor

Bitümün tersine organik polimerler rijitlik bağlamında sıcaklık değişimlerine çok daha az duyarlıdır. PMB'lerin azaltılmış sıcaklık duyarlılığı neticesinde; yüksek kaplama hizmet sıcaklıklarında tekerlek izinin azaltılabilmesi için bitüm rijitliğinin artırılması,

düşük kaplama sıcaklıklarında ise kırılgenlik ve çatlakların azaltılabılması için bitüm rijitliğinin azaltılması mümkün olmaktadır (Green, 1998).

Bitüm modifiye edici olarak kullanıldıklarında plastomerler genellikle, yüksek sıcaklık özellikleri, yaşlanma direnci ve depolama stabilitesi üzerinde pozitif etki ederler. Ayrıca ısısal olarak stabildirler. Ancak plastomerler elastisitede ve düşük sıcaklık özelliklerinde kısıtlı iyileşme, homojen dağılımda zorluğa neden olurlar. Bu sorunlar plastomerlerin asfalt betonlarında yaygın kullanımını kısıtlamaktadır (Xie ve Shi, 2014).

Elastomerler ile modifiye edilen asfalt beton kaplamanın performansı, bitümün kaynağına, bitüm-polimer uyumluluğuna ve polimer içeriğine bağlıdır. Uygun polimer içeriği ve bitüm polimer uyumluluğu, özellikle yüksek sıcaklıklarda bitümün viskozite, rijitlik ve elastik tepkisinde artış sağlayacak şekilde polimerin bitüm içerisinde iyi dağılmasını sağlar. Ayrıca elastomerler düşük hizmet sıcaklıklarında asfalt beton kaplamanın çatlak direncini iyileştirirler. Ancak; yüzeye periyodik olarak asfalt emülsiyon uygulaması (fog seal) yapılmadığı takdirde, elastomerler ile modifiye neticesinde asfalt betonun yaşlanma direnci azalabilir.

Bitüm modifiyesinde yaygın olarak kullanılan elastomerlerden biri, bitüm içerisinde nisbeten iyi dağılıbilirlik (dispersiyon) özelliği ve kabul edilebilir maliyetleri nedeniyle SBS'dir. Ancak, SBS kopolimerleri bitümde tam bir iyileşme sağlamaz ve bitümle uyumu iyi değildir (Zhu vd., 2014).

Öğütölmüş kauçuk ile modifiye neticesinde asfalt betonunda daha yüksek tekerlek izi dayanımı ve daha yüksek düktilite elde edilir, fakat kauçuk oksijen absorpsiyonu ve bozulmaya (dekompozisyon) duyarlıdır.

4.4. Polimer Katkı Oranı Etkisi

Polimer modifiye asfalt beton kaplamanın performansına etki eden bir diğer önemli faktör de eklenen polimer miktarıdır. Genellikle PMB'ler üç gruba ayrılabilir; düşük polimer katkı oranı (%4'ten az), orta polimer katkı oranı (%4-7) ve yüksek polimer katkı oranı (%7)'dir (Xie ve Shi, 2014).

Polimer oranı düşük olduğunda, bitüm içerisinde iyi dağılır. Yüksek sıcaklıklarda, polimerlerin rijitliği bitümden yüksektir. Bu nedenle polimer modifikasyonu asfalt beton kaplamanın mekanik performansını geliştirmektedir.

Düşük sıcaklıklarda polimerlerin rijitliği bitümden düşüktür ve asfalt beton kaplamanın düşük sıcaklık kırılma eğilimi azalmaktadır. Düşük polimer içeriği asfalt beton kaplamanın hizmet sıcaklık aralığını genişletmektedir.

Orta polimer katkı oranında durum daha karmaşıktır. İdeal olarak, modifiye bitüm, sürekli ve birbirine bağlanmış olan polimer ve bitüm fazın özelliklerini taşımalıdır (Xie ve Shi, 2014).

Polimerlerin yüksek oranda eklenmesi yol uygulamalarında arzu edilen bir durum olmayıp, daha çok çatı kaplaması uygulamalarında görülür.

Bitüme ilave edilen polimer miktarı PMB'lerin özelliklerini etkileyen önemli bir faktördür. Çoğu durumda, plastomer ve elastomerlerin miktarı düşük ve orta katkı düzeyindedir ancak kauçuklar genellikle yüksek katkı oranında kullanılır (genellikle %15-20).

Ekonomik açıdan; teknoloji maliyet etkin olduğu zaman, insanlık teknolojiden maksimum faydayı sağlayabilmekte ve uygulama popüler olmaktadır. PMB'ler için maliyet, eklenen polimer oranı ile oldukça ilişkilidir. Polimer oranı, polimer modifiye bitümlerin performansı üzerinde önemli etkilere sahiptir. Bir yol inşaatına başlanmadan önce, tasarımcı öncelikle yoldan beklenen performans derecesine göre PMB kullanımına ve oranına karar vermelidir (Zhu vd., 2014).

Polimer oranı konusunda; Avrupa Bitüm Üreticileri Birliği (Eurobitume), ağırlıkça %3,5 oranında SBS polimer içeriğinin uygun olacağını belirtmektedir (Zhu vd., 2014).

4.5. Uyumluluk ve Stabilit 

Polimer modifiye bitümün uygulamadaki performansında önemli olan faktörlerden biri polimer ile bitüm arasındaki uyumluluğun derecesidir. Güçlü uyumluluk; depolama, pompalama, inşaat ve hizmet boyunca polimerlerin bitüm içerisinde toplanmasını (aglomerasyon)  nleyecektir.

Stabil bir sistem elde edebilmek için, asfaltten ve polimerlerin oranı ile boyutu ve malten fazın aromatikliği de dahil olmak üzere birkaç faktör dikkate alınmalıdır. Yüksek aromatik oranı, polistren etki alanında azalmaya yol açar, yumuşama noktası düşer ve akma direnci azalır.

PMB'lerin uyumluluğu ASTM D7173 (Polimerin polimer modifiye asfalttan ayrılma eğiliminin tayini için standart uygulama) standardına göre test edilir. Ancak bu yöntemin polimer modifiye asfalt kaplamanın hizmet ömrü boyunca uzun dönem uyumluluğunu güvenilir şekilde tahmin edebileceğinin garantisi yoktur.

Bitüm içerisindeki polimerler üç grupta incelenebilir; uyumsuz, uyumlu ve çok uyumlu. Eğer bitüm ile polimerler uyumlu değilse, bitümün kolloidal kararlılığı etkilenecek, bu durum kohezyon ve düktilitesi az olan heterojen bir polimer-bitüm karışımına yol açacaktır (Xie ve Shi, 2014).

5. NANO MALZEMELER

Richard Feynman Aralık 1959'da Amerikan Fizikçiler Topluluğunda “There is plenty of room at the bottom” (aşağıda daha çok yer var) konu başlıklı bir konuşma yapmıştır. Konuşmasında atomik düzeyde nesnelerin kullanılmasını önererek, nanoboyutta malzemelerin potansiyeli ve kullanıma olasılığına ilişkin yorumlarda bulunmuştur. Bu konuşma, nanoteknolojinin önceden görülmesi olarak değerlendirilmektedir. Pek çok tahmini günümüzde gerçek olmuştur. Feynman 1965’de Nobel Fizik ödülünü kazanmıştır. Ancak, nanoteknolojinin asıl kullanımı 1990’lı yıllardan sonra gerçekleşmiştir (Arivalagan vd. 2011).

Aslında nanomaddeler insanoğlunun karşısına yeni çıkmamıştır. Karbon karası lastiğin ömrünü uzatmak ve ona siyah rengini vermek için lastiğin hammaddesine katılan bir nanomaddedir. Bu madde ilk olarak 1900’lü yılların başında keşfedilmiştir. Silisyum kauçuğunun bir bileşeni olan silika isi, dolgu macunları ve yapışkanlar da nanomaddelerdir. Bunlar ticari olarak 1940’lı yıllarda piyasaya çıkmışlardır (Wilson vd., 2012).

“Nano” teriminin kökü Yunanca “cüce” anlamına gelmekle birlikte, bilimsel konuşmalarda 10^{-9} ifadesinin kısaltmasıdır ve bu yüzden de nanometre 10^{-9} m demektir. Teknoloji demek, bilimsel prensiplerden yola çıkılarak faydalı şeyler üretmek demektir. Bu sebeple nanoteknoloji 10^{-9} seviyesinde kullanılabilir malzemeler üretmek anlamına gelmektedir (Wilson vd., 2012).

Son 20-30 yılda, nanomalzemelerin nitelendirilmesi ve kullanımına yönelik ileri teknoloji ürünü, Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM), Geçirimli Elektron Mikroskobu (TEM) ve Taramalı Prob Mikroskobu (SPM) gibi aletlerin kullanımıyla nano dünyanın kapılarını araştırmacılara açmıştır (Arivalagan vd. 2011).

Nanoteknoloji, en azından bir karakteristik boyutu nanometre ile ölçülen fonksiyonel yapıların tasarım, inşaat ve kullanılmasını kapsar. Nanoteknoloji çalışması,

boyut nanometre ölçeğine doğru küçüldükçe, maddenin fiziksel davranışında önemli değişiklikler göstereceği görüşüne dayanır (Brydson ve Hammond, 2005).

Nanoparçacık; ebatları nanometre (nm) ile ölçülen mikroskopik parçacıklardır. En az bir boyutu 200 nm'den küçük parçacık olarak tanımlanır (Mann, 2006).

Nanoteknoloji nano yapılı malzemelerin sentezi, tanımlanması, keşfi ve kullanılması ile ilgilenir. Nanometre metrenin milyarda biridir. Nanomalzemelerin fiziksel ve kimyasal özellikleri aynı kimyasal bileşimde olduğu tek atom (molekül) veya kaba maddeye kıyasla belirgin ölçüde farklıdır. Bu farklılıklar, yapı ve şekil, faz değişimleri, elektronik yapı ve kimyasal reaktivite vb. nedenlerden kaynaklanmaktadır (Rao ve Cheetham, 2006).

Nano ölçek bilim veya nanoteknoloji; boyutu yaklaşık 1-100 nm arasında olan maddelerin anlayış ve kontrolüdür. 1 nanometre insan saç telinin genişliğinden 100 000 kat daha küçüktür (FHWA, 2009).

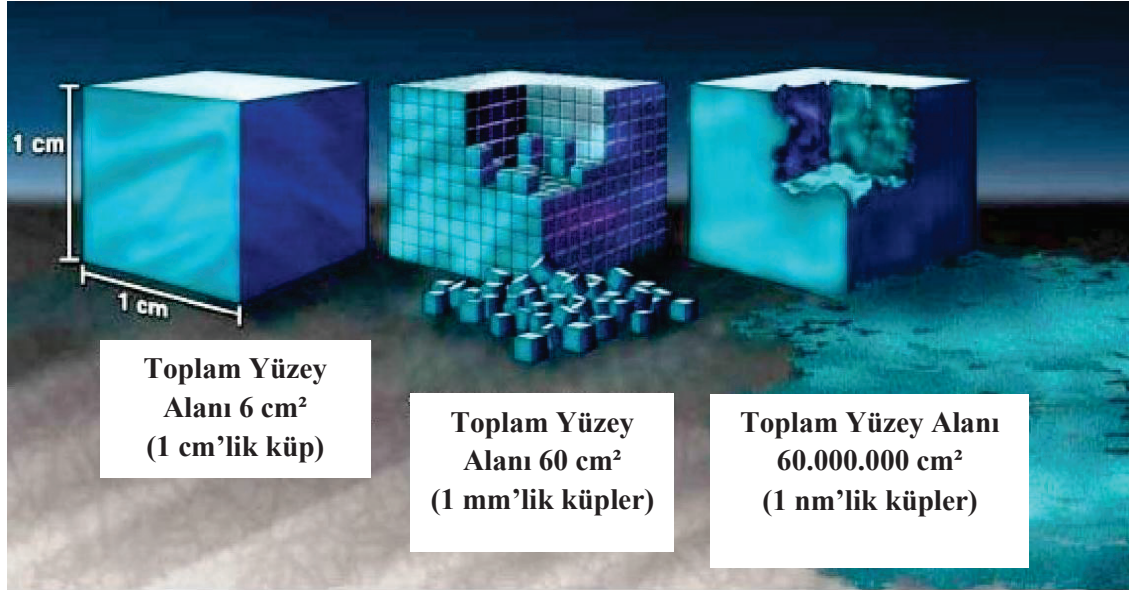
Bilimsel araştırmalar daha küçük ölçeklere doğru kaydıkça, karmaşık sorunları çözmek için yeni ve yaratıcı araştırma metodları ile ortaklıklara ihtiyaç duyulmaktadır.

Nanoteknoloji; malzemenin çok küçük parçalarının kendilerinin veya bunların büyük ölçekli yeni malzeme oluşturulması için kullanımını kapsar. Parçacıkların boyutu kritik faktördür. Nano ölçekte malzeme özellikleri büyük ölçekteki duruma göre değişmektedir. Tam olarak bu durumun oluştuğu nokta malzemeye bağlıdır. Nanomalzeme boyutu, içerisine katıldıkları karışımların özellikleri üzerinde önemli etkiye sahiptir (Mann, 2006).

Nanomalzemelerin özelliklerini diğer malzemelerden ayıran başlıca iki faktör vardır, bunlar; artan yüzey alanı ve kuantum etkileridir. Parçacık boyutunun yüzey alanına olan etkisini anlayabilmek için şöyle bir örnek verebiliriz; gümüş bir ABD doları ele alalım. Gümüş dolar 26,96 g gümüş içermekte olup, çapı 40 mm'dir. Toplam yüzey alanı ise yaklaşık 27,70 cm²'dir. Aynı gümüş para örneğin, 1 nm çapında küçük parçacıklara

bölündüğünde, bu parçacıkların toplam yüzey alanı 11.400 m² olmaktadır. Bu da yüzey alanı olarak yaklaşık 4 milyon 115 bin katıdır (Arivalagan vd. 2011).

Kenar uzunluğu 1 cm olan bir kübün; 1 mm ve 1 nm'lik parçalara ayrılması halinde toplam yüzey alanında meydana gelen değişimler Şekil 5.1' de gösterilmiştir.



Şekil 5.1. Nanomalzemelerde artan yüzey alanı (<https://www.nano.gov/nanotech-101/special>)

Çeşitli ölçekler arasındaki farklılıkları daha iyi anlayabilmek için ölçek kategorileri ve ilgili konuları Çizelge 5.1' de özetlenmiştir.

Çizelge 5.1. Ölçekler ve konu alanları (Ge ve Gao, 2008)

Ölçekler, metre	İlgili Konu
10^{-12}	Kuantum Mekaniği
10^{-9}	Moleküler Dinamik Nanomekanik Moleküler Biyoloji Biofizik
10^{-6}	Elastisite Plastisite Dislokasyon
10^{-3}	Malzeme Mekaniği
10^{-0}	Yapısal Analiz

5.1. Nanomalzemelerin Mekaniksel ve Kimyasal Özellikleri

Malzemelerin mekaniksel özellikleri, metallerin dayanıklılığı onların nanoölçekli taneler yapılmasıyla büyük ölçüde arttırılır. Maddelerin temel mekanik özelliklerini tanımlarken çeşitli kavramlar önemlidir, bunlardan birisi şiddet (dayanıklılık)'tir ve bir malzemenin kuvvet uygulandığında buna karşı nasıl bozulduğunu açıklar. Sertlik ise, elmas gibi bir maddenin başka bir madde içine işleme miktarıdır. Aşınma direnci, bir malzemenin başka bir malzeme ile temas ettiğinde aşınma miktarı ile belirlenir (Köksal ve Köseoğlu, 2014).

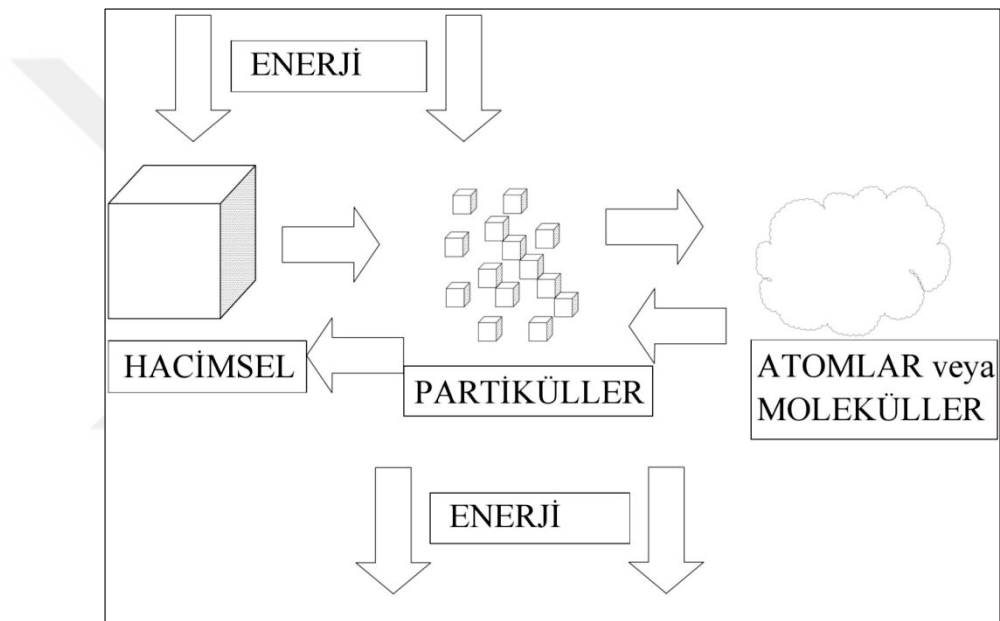
Nanomalzemelerin büyüklüğe bağlı başka bir özelliği, kimyasal tepkimeleridir. Buna altın örnek olarak verilebilir. Altın iri halde soy bir malzemedir. Bu, altının yüksek değerli olmasının nedenidir, çünkü aşınmaz ve paslanmaz zamanla değişmeyen kaliteye sahiptir. Sadece konsantre nitrik asit ve hidroklorik asit karışımı altına hücum edebilir. Böylece, kimyasal reaksiyonları (tepkimleri) hızlandırmak için kolaylaştırıcı (katalizör) görevi yapamaz gibi görünmektedir. Ancak, altın nanoparçacıklarda durum böyle değildir. Altın, çapları 5 nm'den küçük nanoparçacıklar halinde ise güçlü bir kolaylaştırıcı olur (Köksal ve Köseoğlu, 2014).

5.2. Nanomalzeme Üretim Yöntemleri

Boyutu 100 nanometrenin (nm) altında olan nanopartiküller, normal yapıli malzemelerden farklı ve üstün olarak kabul edilen özellikler sergileyebilirler. Nanomalzemeler bu özellikleri sayesinde elektrik-elektronik, biyomedikal, otomotiv ve kimya sektörleri başta olmak üzere birçok endüstriyel alanda kullanıma sahiptirler. Nanomalzemelerin fizikokimyasal ve morfolojik özellikleri kullanılan başlangıç malzemesinin karakteristiğinden etkilenmesinden dolayı farklı üretim yöntemlerinin geliştirildiği görülmektedir.

Nanomalzemelerin üretiminde kullanılan yöntemler; Şekil 5.2' den görülebileceği gibi aşağıdan yukarı "bottom up" ve yukarıdan aşağı "top down" olarak adlandırılan iki ana yaklaşım altında incelenmektedir.

Yukarıdan aşağıya yaklaşımına dahil olan yöntemlerde hacimsel malzemeye dışarıdan mekaniksel ve/veya kimyasal işlemler ile enerji verilmesi sonucunda malzemenin nano boyuta kadar inebilecek küçük parçalara ayrılması esas alınmaktadır. Diğer bir tanımlama ile yukarıdan aşağı yöntemi; bir malzeme bloğunu ele alıp bundan istenilen küçük yapıyı elde etme adına onu bölme, parçalama veya şekillendirmedir. Bu yaklaşıma mekanik öğütme ve aşındırma örnek verilebilir. Bu tekniklerde klasik öğütme işlemlerinden çok daha fazla enerji tüketimi gerçekleştiğinden, yüksek enerjili öğütme veya yüksek hız değirmenleri olarak da adlandırılmaktadırlar.



Şekil 5.2. Nanopartikül üretiminde kullanılan yaklaşımlar (Wolfgang, 2004)

Aşağıdan yukarıya yaklaşım yöntemleri; atomik veya moleküler boyuttaki yapıları kimyasal reaksiyonlar ile büyütürken partikül oluşumunun gerçekleştirilmesi olarak tanımlanmaktadır. Nanokristalin metal ve alaşımlarının üretiminde kullanılan ilk yöntem olan gaz yoğunlaştırma tekniği aşağıdan yukarıya yaklaşımı ile çalışmaktadır. Kimyasal buhar kaplama, kimyasal buhar yoğunlaştırma, sol jel ve sprej piroliz yöntemleri de bu yaklaşımın en çok bilinen diğer üyeleridir.

Ayrıca nano malzeme üretim yöntemleri fiziksel veya kimyasal temelli olmak üzere iki ayrı şekilde sınıflandırılabilir. Mekanik enerjinin kullanıldığı gibi fiziksel özelliklerin ön plana çıktığı yöntemler fiziksel, kimyasal reaksiyonların gerçekleştiği yöntemler ise kimyasal temelli olarak kabul edilmektedir.

Nanomalzeme üretimde kullanılan yöntemlerden en çok bilinen altı tanesi; plazma arkı, kimyasal buhar biriktirme, elektrobiriktirme, sol-jel sentezi, bilyeli öğütme ve doğal nanoparçacıkların kullanılmasıdır. İlk iki yöntemde molekül ve atomlar buharlaştırmayla birbirlerinden ayrıştırılmakta ve daha sonra dikkatli ve düzenli bir biçimde nanoparçacıkları oluşturmak üzere madde yüzeyine çöktürülmektedir. Üçüncü yöntem olan elektrobiriktirmede tekil parçaların çözeltiden hareketle çökeltilmesi söz konusu olduğundan benzer durum söz konusudur. Sol-jel sentezi çökeltme öncesinde bir hazırlık sürecine ihtiyaç duymaktadır. Bilyeli öğütmede bilinen makrokristal yapılar nanokristal boyuta parçalanır ancak malzemenin başlangıçtaki yapısal bütünlüğü korunur. Bunların yanı sıra nanoparçacıklardan da yeni malzemeler üretmek mümkündür ki bunda orijinal kristal bağlarının kopması söz konusu olmaktadır (Wilson vd., 2012).

Nazarov ve Mulyukov (2003) ise nanomalzeme elde etme yöntemlerini dört ana gruba ayırmaktadır, bunlar; toz teknolojisi, şiddetli plastik deformasyon metodu, amorf (şekilsiz) halden kristalizasyon ve biriktirme metodlarıdır.

Çalışma kapsamında Mekanik aşındırma (MA) yöntemi kullanıldığı için bu yöntem ayrıntılı olarak açıklanacaktır.

5.3. Mekanik Aşındırma Yöntemi

Toz partiküllerin mekanik aşındırma (MA) yöntemi ile üretimi 1970'li yıllarda endüstriyel uygulamalar için geliştirilmiş olup, yeni alaşımlar ve faz karışımlarının üretimi bu teknik sayesinde başarıyla gerçekleştirilmektedir. En ucuz yukarıdan aşağıya üretim yöntemidir. Nano yapılar atomik veya moleküler düzeyden kümesel toplanma şeklinde değil, kaba taneli yapıların plastik deformasyonu sonunda ayrışmasıyla oluşur. Mekanik aşındırma yönteminde alaşım, intermetalik, seramik ve kompozit gibi amorf veya nano yapıları malzemelerin geniş bir bileşim aralığında üretimi gerçekleştirilebilmektedir. Bu amaç için kullanılan birçok farklı bilyalı öğütücüler; aşındırma, gezegen ve titreşimli öğütücüler ile yüksek enerjili bilyalı değirmenlerdir.

Öğütme işlemi esnasında, kap içerisindeki toz halindeki parçacıklar (toz parçacıklarının büyüklüklerinin 1-200 µm olması tercih edilir) bilyeler arasında yada

bilyeler ile öğütme kabının çeperleri arasında kalırlar. Parçacıklar bu çarpışmalar ve ezilmeler esnasında büyük etkilere yani enerji geçişlerine maruz kalırlar. Öğütülecek malzeme toz halinde değilse yani iri daneli ise bu malzemeyi toz haline getirmek gerekmektedir. Bu işlemde basitçe bir agat yardımıyla yapılabilir. Malzeme öğütme kabına koyulduktan sonra gerekli öğütme parametreleri belirlenir ve öğütme işlemi yapılır.

Öğütme parametreleri; öğütme kabı, öğütme hızı ve zamanı, bilye-örnek ağırlığı oranı, öğütme kabının doluluk oranı ve kullanılmasına gerek duyulduğu takdirde çözücü türü ve miktarı, öğütme atmosferi'dir (Tekerek, A.Ş., 2007).

Öğütme kabının seçimi çok önemlidir, çünkü öğütme esnasında bilyeler öğütme kabının çeperlerine vurduğundan, çeper iç duvarlarından kopmalar olabilir, bu durum örnek içerisinde safsızlığa neden olabilir. Benzer şekilde kullanılan bilya bileşiminden safsızlık karışması da söz konusu olabilmekte olup, bu durum mekanik aşındırma yönteminin en büyük dezavantajıdır. Öğütülen malzeme için homojen dağılım elde etmek de sorun olabilmektedir.

Öğütme hızı yüksek seçildiği takdirde bilyelerin çarpma hızı artacağından, öğütme işlemindeki enerji de artmış olacaktır. Fakat fazla enerji her zaman iyi ve doğru sonuçlara yol açmamakta, bazı durumlarda safsızlık oluşmasına neden olabilmektedir.

Öğütme zamanı en önemli parametredir. Öğütme süresi arttıkça, parçacık büyüklükleri bir limite kadar azalmaktadır. Ancak fazla öğütmeden dolayı kristal fazdan amorf faza geçiş olabilir, bu da istenmeyen bir durumdur.

Bilye-örnek ağırlık oranı diğer bir önemli parametredir. Oran arttıkça, numune kendine göre daha büyük bir kütlenin çarpmasına maruz kalacağından, üzerine etkiyen çarpışma enerjisi de artacaktır. Bu durumda bilye-örnek oranı arttıkça öğütme zamanını bir miktar azaltmak gerekir. Yapılan çalışmalarda bilye-örnek ağırlık oranı en düşük 1:1, en yüksek de 220:1 olarak seçilmiştir. Öğütme işlemi esnasında parçacık büyüklüklerini homojen bir dağılımla elde edebilmek için, mümkün olduğu kadar küçük yarıçapa sahip bilye kullanılması gerekmektedir (Tekerek, A.Ş., 2007).

Öğütme kabının içerisinde fazla boşluk olması bilyelerin örnekle etkileşmemesine, fazla dolu olması ise bilyelerin hareket edemeyerek örneğe gerekli çarpma enerjisinin verilememesine neden olabilir. Bu yüzden öğütme kabının içerisindeki boşluk iyi ayarlanmalıdır. Öğütme kabının %50'sinin boş olması uygun olmaktadır.

Öğütme esnasında oluşan plastik deformasyonlar parçacıklar arasında soğuk kaynamalara neden olur ve bazen bu soğuk kaynamaların çok fazla olmasından dolayı çok sayıda parçacık birleşerek daha büyük parçacıklar oluştururlar, bu durumda istenilen nano boyuta ulaşamamış olur. Bu olayı engellemek için çözücüler kullanılırlar. Toz parçacıkları tarafından bu çözücüler soğurular ve bu şekilde soğuk kaynak etkisi azalır. Kullanılacak çözücü türü öğütülecek örneğin kimyasal yapısına göre belirlenir. Çözücü miktarı ise genellikle toplam toz ağırlığının %1-5'i kadardır (Tekerek, A.Ş., 2007).

Öğütme kabının içindeki atmosfer oldukça önemlidir. Açık atmosferde gerçekleşen proseslerde metalik partiküller oksitlenmekte ve yüzeyde azotlu yapılar oluşmaktadır. Fakat bu sorun öğütücü haznesinin asal gaz (argon veya helyum) ile doldurulması ve sızdırmaz uygun contaların kullanılmasıyla ortadan kaldırılabilmektedir (Gürmen ve Ebin, 2008).

5.4. İnşaat Mühendisliğinde Nanoteknoloji ve Uygulamaları

Nanoteknoloji ürünleri pek çok alanda tasarım ve inşaat süreçlerinde kullanılabilir. Nanoteknoloji ile üretilmiş ürünlerin pek çok özelliği olup, bu özellikler mevcut inşaat problemlerini giderebilir ve inşaat sürecinin gereklilikleri ile organizasyonu sürecini değiştirebilir. Nanoteknoloji ürünleri inşaat sektöründe aşağıda belirtilen alanlarda büyük yarar sağlamaktadır: (Ge ve Gao, 2008)

- Daha hafif ve güçlü yapısal kompozitlerin üretilmesi,
- Az bakım gerektiren kaplamaların üretimi,
- Boru birleşim malzeme ve tekniklerinin geliştirilmesi,
- Çimentolu malzemelerde daha iyi özellikler elde edilmesi,
- Alev geciktiricilerde ısısal transfer hızının azaltılması,
- Akustik malzemelerde ses yutuculuğun artırılması,

- Camın yansıtıcılığının artırılması.

İnşaat malzemelerinin uygulanmasında ön plana çıkan iki nano boyutlu parçacık titanium dioxide (TiO_2) ve karbon nano tüpler (CNT)'dir. CNT'ler betonun güçlendirilmesi ve gözlenmesinde kullanılır. TiO_2 ise parlaklığı nedeniyle yaygın olarak kullanılan beyaz bir pigment'tir. Oksijeni veya organik malzemeleri okside edebilir, bu nedenle boya, çimento ve pencereler gibi yerlerde kullanılır (Mann, 2006). Yapılarda kullanılan nano malzemelerden örnekler Çizelge 5.2' de verilmiştir.

Çizelge 5.2. Yapılarda kullanılan nano malzemelerden örnekler (Demirdöven ve Arditi, 2012)

Nano malzemeler	Yapı malzemeleri	Beklenen faydalar
Karbon nanotüpler (CNT)	Beton, Seramik Cihazlar (Nano Elektro mekanik/Mikro elektro mekanik) Güneş pili	Sağlamlık Çatlamayı önleme Geliştirilmiş mekanik ve termal özellikler Sağlık izleme Etkili elektron iletimi
Silisyum dioksit nano parçacıklar (SiO_2)	Beton, Seramik, Cam	Mekanik mukavemete katkı Soğutma Işık iletimi Ateşe dayanıklılık ve tutuşmazlık Yansıma önleme
Titanyum dioksit nano parçacıklar (TiO_2)	Beton, Cam Güneş pili	Hızlı hidrasyon Hidrasyon düzeyini artırma Kendi kendini temizleme Süper su emicilik Buğulanma önleme Kirlenmeye direnç Elektrik üretimi
Demir III oksit nano parçacıklar (Fe_2O_3)	Beton	Basınç dayanımını artırma Aşınmaya dayanıklılık

Karayollarında çeşitli nano-ölçek uygulamalar mevcuttur. Beton, çimento ve suyun kimyasal reaksiyonu neticesinde nano ölçekte boşluklar içeren bir malzemedir. Tekrarlı olarak buz çözücü kimyasallara maruz kalması neticesinde betonun yapısında oksidasyon, çatlaklar ve uzun vadeli bozulmalar görülmektedir. Kendiliğinden iyileşen akıllı malzeme ve yapıların üretilmesi için nanoteknolojinin kullanılması, daha az sıklıkta ve daha hızlı inşaat yapılmasını sağlayacak, durabilitenin artması ve malzeme performansının iyileşmesi neticesinde ciddi bozulmaların önüne geçilebilecektir (FHWA, 2009).

Nanoteknoloji alanındaki ilerlemeler; kendisi de bir nano malzeme olan betonun çevresel ve kimyasal etkilere (buz çözücü tuzlar) karşı daha dayanıklı olmasını ve kendi kendine iyileşen akıllı betonların geliştirilmesini sağlamıştır.

Agreganın etrafını saran bitüm kalınlığı birkaç mikron boyutundadır. Fakat, bitümün özellikleri üzerine yapılan çalışmaların büyük çoğunluğu bu küçük boyut üzerine odaklanmamaktadır. Nanoteknoloji, agrega ve bitüm arasındaki bu içsel özelliklerin daha iyi anlaşılması ve modellenmesine öncülük etmelidir. Çeşitli açılardan, nanoteknolojinin mevcut ve uygun malzemelerin iyileştirilerek kaplamalarda kullanılması ve bu malzemelerin işlenerek, istenen özellikleri sağlayabilecek sürdürülebilir ve kalıcı üstyapılar inşa edilebilmesinde önemli rol oynayabileceği kabul edilebilir.

Genel olarak nanoteknoloji faydalarını iki yol ile gösterir. Bunlar; (Yang ve Tighe, 2013)

- Mevcut ürünler ve süreçleri daha ekonomik, dayanıklı ve etkin kılmak,
- Tamamen yeni ürünler meydana getirmektir.

Bitüm ve BSK'ların özellikleri üzerinde nanoteknolojinin faydaları şöyle özetlenebilir; (Yang ve Tighe, 2013)

- Polimer modifiye bitümlerde depolama stabilitesini iyileştirmek,
- UV yaşlanmaya direnci artırmak,
- Su, kar ve buz çözücülerin bulunduğu ortamlarda nem hassasiyetini azaltmak,
- Düşük sıcaklıklarda asfalt beton karışımların özelliklerini iyileştirmek,
- Asfalt beton kaplamaların durabilitesini artırmak,
- Enerji ve maliyetten tasarruf sağlamak,
- Bakım giderlerini azaltmaktır.

Nanoteknolojinin yol mühendisliğinde uygulamalarına ilişkin problem sahaları üç noktada özetlenebilir: (Steyn, 2011)

- Mevcut teknoloji kullanılarak etkili bir şekilde ele alınamayan mevcut ihtiyaçların belirlenmesi,
- Yol mühendisliği alanında uygulanabilir nanoteknoloji çözümlerinin belirlenmesi,

- İki konsept birleştirilerek en yüksek fayda/maliyet oranları elde edilecek nanoteknoloji çözümlerinin belirlenmesi'dir.



6. BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIM TASARIM YÖNTEMLERİ

Kaplama tasarımının amacı, kaplamanın hizmet ömrü boyunca oluşacak maliyetleri (inşaat, bakım, trafik gecikmeleri, yakıt tüketimi, vb.) en aza indirgeyerek trafik yüklerini etkin bir şekilde dağıtabilecek mühendislik yapıları üretebilmektir. Farklı tabakalarda kullanılacak malzemelerin seçilmesi ve gereken kalınlıkların hesaplanmasını kapsar. Kaplamanın yük taşıma kapasitesi malzemenin kalınlığı ile rijitliğinin bir fonksiyonudur. Tabakaları oluşturan malzemenin mekanik özellikleri üstyapı tasarımında önem taşır. Nem; temel ve alttemel tabakaları ile tabii zemine, sıcaklık ise bitümlü tabakalara etki ettiği için, üstyapı tasarımında iklim koşullarının hesaba katılması önem taşımaktadır. Kaplama performansına etki eden faktörler Çizelge 6.1’de verilmiştir.

Çizelge 6.1. Kaplama performansına etki eden faktörler (Speight, 2016)

Malzemeler	Karıştırma	İnşaat	Karışım tasarımı
Bitüm tipi Bitüm özellikleri Agrega Bitüm-agrega uyumu Katkılar	Sıcak veya soğuk karıştırma plenti	Nakliye Sıkıştırma Kalite kontrol	Kesik gradasyon Açık gradasyon Bitüm oranı Bitüm film kalınlığı Hava boşlukları
Kaplama yapısı	Trafik yükleri	Çevre	
Kalınlık Temel dayanımı Alttemel dayanımı Tabii zemin dayanımı	Trafik cinsleri Yük tekrarı Lastik özellikleri	Sıcaklık Su Oksidasyon Don çözülmesi	

Bir arabanın etkisiyle oluşan yükleme kaplamada herhangi bir yapısal bozulmaya neden olmamaktadır. Yüksüz ağırlığı 15 kN’dan büyük olan taşıtlar olarak tanımlanan ticari araçlar yapısal bozulmaya neden olurlar. Kaplamanın trafik yüklerine maruz kalmasıyla oluşan iki klasik tip bozulma mevcuttur. Bunlar; temel tabakasının alt tarafında oluşan yorulma çatlakları ve birikimli deformasyonlardır (Mallick ve Korchi, 2013).

BSK’ların dayanımını etkileyen faktörlerden biri sahada serilen asfalt beton karışımının yapısını temsil eden gerçekçi deney numunelerinin laboratuvar ortamında oluşturulabilmesidir. Khan vd., (1998) tarafından sahada standart sıkıştırma teknikleri

kullanılarak, serilen malzemeye benzer mühendislik özelliklerine (Hava boşluğu, esneklik modülü, yoğunluk ve sertlik, vb.) sahip malzemelerin laboratuvarında elde edilmesi için uygun sıkıştırma tekniklerinin seçilmesine yönelik yapılan çalışma kapsamında; Marshall Otomatik Sıkıştırma, Marshall El İle Sıkıştırma, Kaliforniya Yoğurmalı Sıkıştırma, 1,25° açılı yoğurmalı kesme sıkıştırma ve 6° açılı yoğurmalı kesme sıkıştırması teknikleri uygulanmıştır.

Suudi Arabistan'ın doğusunda dört farklı yerde yeni inşa edilen yollardan alınan asfalt beton numuneleri yukarıda belirtilen beş farklı sıkıştırma tekniği ile sıkıştırılmıştır. 1,25° açılı yoğurmalı sıkıştırma tekniği ile arazide elde edilen değerlere en yakın marshall stabilite değerleri, hacim yoğunluğu ve hava boşluğu oranları elde edilmiştir.

Elastik, viskoelastik ve kalıcı deformasyon miktarının tespitine yönelik olarak yapılan sünme deney sonuçlarından, 1,25° açılı yoğurmalı kesme sıkıştırıcı ile sıkıştırılan asfalt beton karışımlarda en yüksek elastik deformasyon ve en düşük kalıcı deformasyonun görüldüğü tespit edilmiş, esneklik modülü değerlerinin değişkenlik gösterdiği ancak arazide elde edilen değerlere en yakın değerlerin elde edildiği görülmüştür.

6.1. Marshall Tasarım Metodu

Karışımın marshall stabilitesi, 60° C standart deney sıcaklığında numunenin taşıyabileceği maksimum yük olarak tanımlanır. Akma ise, deney numunesi maksimum yüke maruz kaldığı esnada meydana gelen deformasyondur. ASSHTO T 245, ASTM D6926 ve D6927 tasarım yöntemine ilişkin standartlardır (Asphalt Institute, 2007).

Karışım hazırlanmasında kullanılacak bitüm, 40/50 ve 60/70 penetrasyon için 145-160 °C, 75-100 penetrasyon ise 140-155 °C'ye kadar ısıtılır. 150-160 °C'ye kadar ısıtılmış olan agreganın üzerine bitüm dökülerek karıştırılmak suretiyle asfalt beton numuneler hazırlanır. Karışımın üzerine 4,54 kg ağırlığındaki tokmak 45,7 cm yükseklikten düşürülerek tasarım kriterinde belirtilen darbe sayısında bir yüzü sıkıştırılır ve daha sonra kalıp ters çevrilerek numunenin diğer yüzü de aynı darbe sayısında sıkıştırılır. Tasarımı yapılan asfalt beton kaplamanın cinsine göre her yüze 50 veya 75 darbe uygulanır. 101,6

mm (4 inç) çapındaki kalıp içerisinde sıkıştırılan numunelerin sıkışmış yüksekliği 63,5 mm (2,5 inç) olmalıdır.

AASHTO T 245'te belirtilen stabilite düzeltme faktörleri kullanılarak deney sonuçları düzeltilebilir (Garber ve Hoel, 2009; Tunç, 2007; Hunter vd., 2015).

Numuneler 2-3 saatlik soğumadan sonra kalıptan çıkartılır ve 24 saat bekletilerek kür edilir. Bu arada numunelerin yoğunlukları saptanır. Numuneler 60°C'deki su banyosunda 30-40 dakika bekletilir. Marshall stabilite aleti, kırılınca kadar numuneye 50,8 mm/dak'lık sabit yük uygular. Numunenin yük altında kırılma anındaki stabilitesi ve akma (düşey deformasyon) değerleri ölçülür (Nikolaides, A., 2015). Stabilite - kg ve akma - mm olarak kaydedilir. Aşınma ve binder asfalt beton tabakaları için marshall tasarım sınır değerleri Çizelge 6.2, aşınma tabakası için Karayolları Teknik Şartnamesinde yer alan agrega gradasyon limitleri Çizelge 6.3'de verilmiştir.

Metodun tasarım aşamaları aşağıda sıralanmıştır:

- Kullanılacak agrega gradasyonuna karar verilir,
- Tasarım gradasyonu elde etmek için her agrega boyutundan gerekli olan oranlar tayin edilir,
- Agrega karışımı ve bitümün özgül ağırlıkları ölçülür,
- Muhtelif bitüm oranlarında deneme numuneleri hazırlanır,
- Sıkıştırılan her numune için özgül ağırlık tespit edilir,
- Numuneler üzerinde stabilite deneyi gerçekleştirilir,
- Her numune için boşluk ve bitümle dolu boşluk yüzdeleri hesaplanır,
- Elde edilen verilerden optimum bitüm oranı tayin edilir,
- Tasarım değerlendirmesi yapılır.

Marshall metodunun avantaj ve dezavantajları aşağıda sıralanmıştır: (Sadid vd., 2010)

Avantajları;

- Ekonomik deney ekipmanı,
- Boşluk, dayanım ve durabilite üzerine yoğunlaşması,
- Özel bir eğitim veya kalifiye personel gerektirmemesi.

Çizelge 6.2. Asfalt betonu tasarım kriterleri (Karayolu Teknik Şartnamesi, 2013)

Özellikler	Binder		Aşınma (Tip 1 ve 2)		Aşınma (Tip 3)		Deney Standardı
	Min.	Maks.	Min.	Maks.	Min.	Maks.	
Darbe Sayısı	75		75		75		TS EN 12697-30
Marshall Stabilitesi, kg	750	-	900	-	400	-	TS EN 12697-34
Boşluk, %	4	6	3	5	5	12	TS EN 12697-8
Bitümle Dolu Boşluk, %	60	75	65	75	-	-	TS EN 12697-8
Agregalar Arası Boşluk, %	13	15	14	16	-	-	TS EN 12697-8
Akma, mm (0,01 inç)	2(8)	4(16)	2(8)	4(16)	2(8)	4(16)	TS EN 12697-34
Filler/Bitüm Oranı	-	1,4	-	1,5			
Bitüm, (ağırlıkça, 100'e)	3,5	6,5	4,0	7,0	5,0	8,0	TS EN 12697-1
İndirekt Çekme Mukavemeti Oranı, min.%	80		80		80		AASHTO T 283
Tekerlek İzinde Oturma (30.000 devir, 60°C) maks.%	-		8		-		TS EN 12697-22
Tekerlek İzinde Oturma (3.000 devir, 60°C 5 cm kalınlığında numune) maks. %					7		TS EN 12697-22

Dezavantajları;

- Kesmeye karşı direnci dikkate almaması,
- Sıkıştırma eksenine dik olarak yük uygulanması,
- Darbe yöntemiyle sıkıştırma.

Marshall yöntemi yeni trafik koşullarına uygun bir yöntem değildir. Bu nedenle, bu tasarım yöntemine göre hazırlanan BSK'larda tekerlek izi oluşumlarında sürekli artış görülmektedir. Yöntem kesikli gradasyon karışım tasarımı için uygun değildir. Esasen sürekli gradasyona sahip karışımlar için geliştirilmiştir (Luminari ve Fidato, 1998).

Çizelge 6.3. Aşınma tabakası için gradasyon limitleri (Karayolu Teknik Şartnamesi, 2013)

Elek Boyu, mm (in, No)	TİP-1	TİP-2	TİP-3 (Çok İnce Aşınma)
19 (3/4")	100		
12,5(1/2")	88-100	100	100
9,5(3/8")	72-90	80-100	90-100
6,0(1/4")	-	-	25-33
4,75(No.4)	42-52	55-72	23-31
2,00(No.10)	25-35	36-53	20-27
0,425(No.40)	10-20	16-28	12-18
0,180(No.80)	7-14	8-16	
0,075(No.200)	3-8	4-8	7-11

Marshall yöntemi ile üretilen numuneler, trafik etkisiyle kaplamada oluşan sıkışma koşullarını temsil etmemektedir. İnşaat sahasında silindirle yapılan sıkıştırma işlemi ve taşıtların geçişi, Marshall çekicinden farklı ve daha etkilidir (Luminari ve Fidato, 1998).

6.2. Superpave Tasarım Metodu

Superpave 1987 ve 1993 yılları arasında ABD’de Stratejik Karayolları Araştırma Programı (SHRP)’nin beş yıllık çalışması sonucunda 150 milyon \$’lık bütçe ile geliştirilen BSK tasarım yöntemidir. Superpave’in geliştirilmesindeki ana hedefler; kaplama performansını etkileyen bitüm, agrega ve BSK özelliklerinin tarif edilmesi ve performansa dayalı deney metodlarının geliştirilmesidir (Mallick ve Korchi, 2013).

Superpave tasarımı Marshall karışım tasarımının yerini tamamen alacak olup, superpave tasarımında bitüm ve agrega seçildikten sonra, BSK hacimsel kriterler göz önüne alınarak tasarlanmaktadır. Tasarım yöntemi AASHTO M 323 standardında ayrıntılı olarak anlatılmaktadır (Nikolaides, A., 2015).

Superpave karışım tasarım yöntemi; trafik yükleri ve iklim koşulları altında meydana gelen kalıcı deformasyon, yorulma çatlağı ve düşük sıcaklık çatlaklarını kontrol ederek, tasarım çevre koşullarında kaplama performansını arttırmak için performans esaslı bitüm malzemelerinin geliştirilmesini içermektedir.

Superpave karışım tasarımının amacı aşağıda belirtilen özelliklere sahip BSK'lar elde edebilmektir: (Garber ve Hoel, 2009)

- Yeterli bitüm içeriği,
- Yeterli VMA (Agregalar arası boşluk hacmi) ve hava boşluğu,
- Yeterli işlenebilirlik,
- Kaplamanın hizmet ömrü boyunca yeterli performans karakteristikleri.

Yöntem; normal, geri dönüşümlü, yoğun gradasyonlu, katkılı veya katkısız BSK'lar ile mevcut tabakaların üzerine inşa edilen taş mastik asfalt betonu (SMA) gibi çeşitli özel kaplama karışımlarına da uygulanabilir. Tasarım; malzeme seçimi ve karışım tasarımı yoluyla kalıcı deformasyon, yorulma ve düşük sıcaklık çatlağı gibi bozulmaları doğrudan kontrol eder. Bitümün uzun ve kısa dönem yaşlanması ile karışımın nem hassasiyetini dikkate alır.

Geleneksel bitüm şartnameleri, bitümün standart sıcaklıktaki (25°C) uzama ve esnekliğini belirlemek için düktilite deneyini kullanır. Superpave ise bitümün düşük sıcaklıklardaki sünme rijitliği, sünme ve uzama oranlarını tespit eden kiriş eğme reometresi ve doğrudan çekme deneylerini kullanır.

Superpave şartnamesi, BSK'larda meydana gelen yorulma çatlaklarına, kalıcı deformasyonlara ve düşük sıcaklık çatlaklarına karşı uygun özellikte bitüm kullanımı ile kaplamanın performansını arttırmayı amaçlamaktadır. Bu amaçla, işlenebilirlik ve akıcılığı belirleyen Dönel Viskozimetre (RV), kalıcı deformasyon ve yorulma çatlaklarına karşı bitüm performansını belirleyen Dinamik Kesme Reometresi (DSR) ve düşük sıcaklık çatlaklarına karşı bitüm performansını belirleyen Kiriş Eğme Reometresi (BBR) ve Doğrudan Çekme Deneyi (DTT) kullanılmaktadır.

Superpave'in ana unsurları;

- Superpave performans sınıfı (PG) bitüm özellikleri,
- Agrega özellikleri,
- Superpave karışım tasarım ve analiz yöntemi'dir. (Mallick ve Korchi, 2013)

Superpave tasarımında tasarım sıcaklığı, bitümü sınıflandırmak için kullanılır. PG 64-22 olarak sınıflandırılan bir bitüm, 64°C yüksek sıcaklık, -22°C düşük sıcaklık şartlarını ifade eder (Mallick ve Korchi, 2013).

PG sınıflandırma sistemine göre bir bitüm Çizelge 6.4'de verilen AASHTO MP1 gerekliliklerine göre sınıflandırılır: (Cominsky, 1994; Mallick ve Korchi, 2013)

Çizelge 6.4. AASHTO MP1 gereklilikleri özeti (Zaniewski ve Pumphrey, 2004)

Deney	Performans parametresi	Bitüm	Özellik	Şartname sınırı	Deney sıcaklığı (°C)
RV	Akışkanlık	Saf	Viskozite	3 Pa.s (Maks.)	135°C
DSR	Tekerlek izi direnci	Saf	$G^*/\sin\delta @ 10 \text{ rad/s}$	1,0 kPa (Min.)	Yüksek
DSR	Tekerlek izi direnci	RTFO yaşılandırılmış	$G^*/\sin\delta @ 10 \text{ rad/s}$	2,2 kPa (Min.)	Yüksek
DSR	Yorulma çatlak direnci	PAV yaşılandırılmış	$G^*.\sin\delta @ 10 \text{ rad/s}$	5000 kPa (Maks.)	Orta
BBR	Termal çatlak direnci	PAV yaşılandırılmış	Sünme rijitliği $S @ 60 \text{ s}$	300 Mpa	Düşük (+10°C altı)
			m değeri @ 60 s	0,300	Düşük (+10°C altı)
DTT	Termal çatlak direnci	PAV yaşılandırılmış	Yenilme şekil değişimi @ 1,0 mm/dak	1,00%	Düşük (+10°C altı)

Yukarıda belirtilen deneylere ilave olarak; bitümün parlama noktası AASHTO T 48'e uygun olarak tespit edilir. (minimum 230°C olmalıdır) RTFOT sonrası kütle kaybı kontrol edilir. (maksimum %1 olmalıdır) RTFOT veya TFO ile yaşılandırılmış bitüm üzerinde AASHTO R 28 standardına göre PAV deneyi gerçekleştirilir. Deney sıcaklığı; PG 46/52 sınıfı için 90°C, 58/64/70/76/82 sınıfı için 100°C, çöl iklimi 70/76/82 için 110°C olarak seçilir.

Kaplama orta hizmet sıcaklıkları PG 46 için 10/7/4, PG 52 için 25/22/19/16/13/10, PG 58 için 25/22/19/16/13, PG 64 için 31/28/25/22/19/16, PG 70 için 34/31/28/25/22/19/16/13, PG 76 için 37/34/31/28/25/22, PG 82 için 40/37/34/31/28 olarak

alınır. Düşük kaplama sıcaklıkları; 6°C'lik azalışlarla -36°C'den 0°C'ye kadardır. Eğer rijitlik 300 MPa'yı aşarsa, doğrudan çekme deneyi (DTT) gerçekleştirilir.

Superpave karışım metodu;

- Tasarım kriterlerini karşılayan bitüm ve agreg a malzemelerinin seçimini,
- Superpave gradasyon gerekliliklerini karşılayan birkaç agreg a deneme karışımının geliştirilmesini,
- Agreg a deneme karışimlarıyla bitümün karıştırılması ve karışımın etüvde kısa dönem yaşlanması,
- Numunelerin sıkıştırılması,
- Karışımın hacimsel özelliklerinin analiz edilmesini,
- Karışım için istenen performans kriterlerinin sağlanabilmesi için en iyi agreg a karışımının tasarım agreg a yapısı olarak seçilmesini içerir (Asphalt Institute, 2007). Superpave karışım tasarım yönteminin yapısı Şekil 6.1' de verilmiştir.

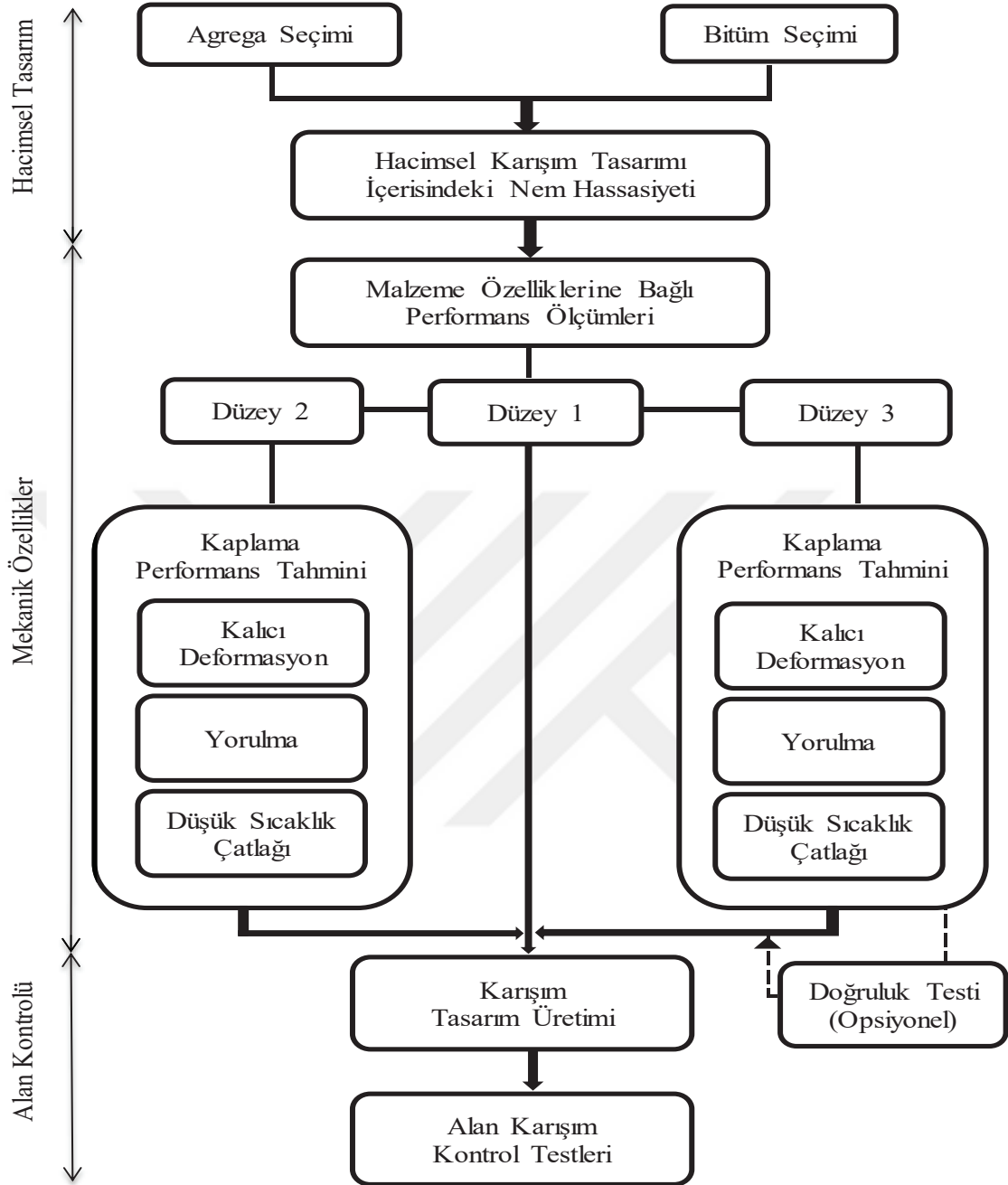
Superpave metodunun avantaj ve dezavantajları aşağıda sıralanmıştır: (Sadid vd., 2010)

Avantajları;

- Diğer iki tasarım karışımına göre daha iyi bitüm özellikleri,
- Daha detaylı düşük sıcaklık deney tasarımı,
- Arazideki sıkıştırma özelliklerini daha iyi temsil eden ve trafik hacmine bağlı olan yoğurmalı sıkıştırıcı kullanımı,

Dezavantajları;

- Bitüm rijitliğinin etkilerinin bu metodla tayin edilememesi,
- İlk maliyetin yüksek olması,
- Daha fazla deney ve kontrol gerektirmesidir.



Şekil 6.1. Superpave karışım tasarım yönteminin yapısı (Cominsky,1994; Garber ve Hoel, 2009; Hunter vd., 2015)

Superpave tasarım yöntemi, marshall tasarım gibi geleneksel yöntemlere göre daha güvenilir bir yöntemdir. İyi tasarlanmış hacimsel karakteristikleri olan bir BSK'nın normalde marshall stabilite ve oranı gerekliliklerini karşıladığı gösterilmiş olup, bu tür karışımların inşaat sahasında beklenen performansı gösterme olasılığı yüksektir. Bununla birlikte, yeterli stabiliteye sahip, ancak hacimsel karakteristikleri uygun olmayan BSK'lar iyi performans göstermeyebilir. Yoğurmalı sıkıştırıcı ile yapılan sıkıştırma ile, numune

sıkıştırıldıkça hacim yoğunluğundaki artış takip edilmekte, bu durum inşaat sahasındaki sıkıştırma sürecinin laboratuvar ortamında simüle edilmesine olanak sağlamaktadır (Luminari ve Fidato, 1998).

Yoğurmalı sıkıştırıcı yönteminde, sıkıştırma verileri; yoğurma açısı, eksenel basınç ve dakikadaki yoğurma sayısının bir fonksiyonudur. Bu parametrelerden herhangi birindeki küçük bir değişim, sıkıştırma verileri üzerinde önemli bir etki yaratabilmektedir (Luminari ve Fidato, 1998).

6.2.1. Superpave agregası şartnamesi

Agregalar, BSK’larda karışımın hacimce %80-85’ini, ağırlıkça %95’ini oluşturan en büyük bileşendir. Agregası karakteristikleri ve kalitesi BSK’ların performansında ana faktörlerdir (FHWA, 2001).

Superpave metodunda agregası tane boyutlarının dağılımının tarifi için “tasarım agregası yapısı” terimi kullanılır. Superpave metodunda nominal maksimum agregası boyutu esas alınarak tanımlanan altı karışım gradasyonu Çizelge 6.5’de verilmiştir.

Çizelge 6.5. Superpave karışım gradasyonları (Asphalt Institute, 2007; Hossain, 2016)

Karışım gradasyonu	Nominal maksimum boyut	Maksimum boyut
(mm)	(mm)	(mm)
37,5	37,5	50,0
25,0	25,0	37,5
19,0	19,0	25,0
12,5	12,5	19,0
9,5	9,5	12,5
4,75	4,75	9,5

Üstyapı performansında bazı agregası özellikleri önemli olup, bunlar; kaba agregası köşeliliği, ince agregası köşeliliği, yassı ve uzun taneli malzemeler, kil içeriği ve gradasyondur. Agreganın temin edildiği kaynağa bağlı olan, don dayanım, sertlik ve zararlı maddeler gibi diğer bazı özellikler de önem taşır.

6.2.1.1. Kaba agreganın köşeliliği

Kaba agreganın köşeliliği; 4,75 mm'den büyük agregaların bir veya daha fazla yüzeyi kırılmış olanlarının toplam agreganın ağırlığına oranı olarak ifade edilir. Kaba agreganın köşeliliğinin tayininde AASHTO TP 61 ve ASTM D5821 standartlarında belirtilen deney tasarımlarından yararlanılır (Cominsky, 1994; Tam, 2006; Advanced Asphalt Technologies, 2011).

Keskin ve köşeli şekilli olan, kırılmış kaba agreganın içeren karışımlar genellikle en yüksek kayma direnci ve tekerlek izi dayanımına sahiptir. Bu tür malzemeler, en yüksek agregalar arası boşluğa (VMA) sahip BSK'ları oluştururlar (FHWA, 2001).

Kaba agreganın köşeliliği için gerekli sınır değerler; trafik düzeyi ve kaplama içerisindeki konumun bir fonksiyonu olarak Çizelge 6.6' da verilmiştir.

Çizelge 6.6. Kaba agreganın köşelilik kriterleri (Cominsky, 1994; FHWA, 1997; Harman vd., 2002; Garber ve Hoel, 2009).

Trafik (ETDY),milyon	Yüzeyden Derinlik	
	< 100 mm	>100 mm
< 0,3	55/ -	-/-
<1	65/-	-/-
<3	75/	50/-
<10	85/80*	60/-
<30	95/90	80/75
<100	100/100	95/90
≥100	100/100	100/100

Not: (*) Kaba agreganın en az %85'inin bir yüzeyi kırılmış, en az %80'inin iki yüzeyi kırılmış olmalıdır.

6.2.1.2. İnce agreganın köşeliliği

İnce agreganın köşeliliği; 2,36 mm elekten geçen sıkıştırılmış agreganın numunesinde mevcut hava boşluklarının yüzdesidir. Bu özelliğin tayininde AASHTO T 304 ve ASTM C1252 standartlarında belirtilen deney tasarımı kullanılır (Tam, 2006).

Sıkıştırılmamış boşluk oranı, dane şekli, köşeliliği ve yüzey yapısı ile ilişkilidir. Bu özellikler, ince agregada içsel sürtünme sağlayarak tekerlek izi direncini artırır. Kırılmış köşeli ince agregalar da kayma direncini artırır. Kırılmış köşeli ince agreganın kullanılması

karışımın VMA'sını arttırır. İnce agreganın köşelilik sınır şartları Çizelge 6.7'de verilmiştir (Harman vd., 2002; Advanced Asphalt Technologies, 2011).

Çizelge 6.7. İnce agreganın köşelilik kriterleri (Cominsky, 1994; McGennis vd., 1995; Garber ve Hoel, 2009).

Trafik (ETDY), milyon	Yüzeyden derinlik	
	< 100 mm	>100 mm
< 0,3	-	-
<1	40	-
<3	40	40
<10	45	40
<30	45	40
<100	45	45
≥100	45	45

Superpave yüksek hacimli yollarda (> 3 Milyon Eşdeğer Tek Dingil Yüğü) sıkıştırılmamış boşluk hacminin en az %45 olmasını öngörmektedir. Kırılarak üretilen ince agregalar yaklaşık %44,5 sıkıştırılmamış boşluk hacmine sahip iken, yuvarlak şekilli doğal kumlar bu değerin altındadır. Dane şekli sıkıştırılmamış boşluk hacmini etkileyebilmektedir. Kübik olarak üretilen bazı ince agregalar, özellikle bazı kireçtaşları (kalkerler) %45'ten daha az (fakat %40'tan fazla) sıkıştırılmamış boşluk hacmine sahiptirler. Ancak kaplama içerisinde iyi performans gösterirler (WesTrack Forensic Team Consensus Report, 2001).

VMA'nın arttırılabilmesi için kübik köşeli ince agreganın kullanımı önerilmektedir. Sıkıştırılmamış boşluk hacmi %47'den fazla olan agreganın kullanımı VMA'yı ve bitüm içeriğini arttıracığından, bu tür tasarımlara dikkat edilmelidir.

6.2.1.3. Yassı ve uzun taneli malzemeler

Kaba agregadaki yassı ve uzun taneli malzemenin yüzdesi önemli bir agreganın parametresidir. Deney “Yassı Parçacıklar, Uzun Taneli Parçacıklar veya Yassı ve Uzun Taneli Parçacıklar” isimli ASTM D4791 standardına göre yapılmaktadır.

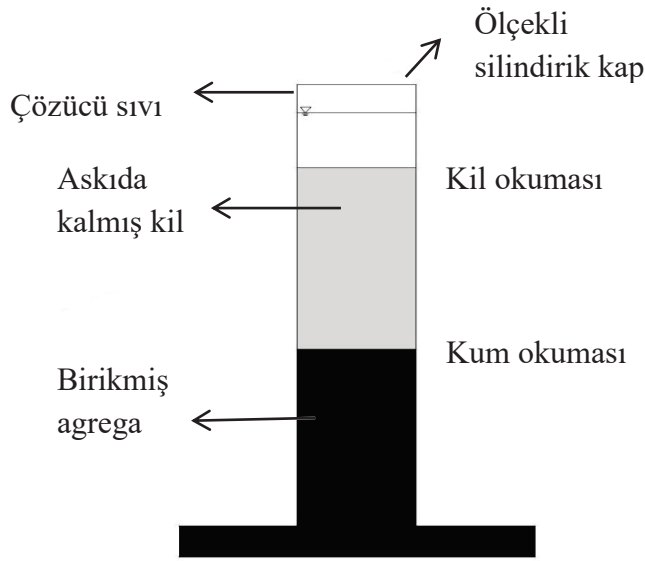
Yassı ve uzun taneli parçacıklar inşaat esnasında kırılarak, karışım gradasyonu ve neticede toplam karışım özelliklerinin değişmesine neden olabilir. Yumuşak agregaların kırılma eğilimi sert agregalara göre daha fazladır. Ayrıca, yassı agrega taneleri kaplama içerisinde düz konumda kaldıklarından, hem kayma yüzeyleri yaratır hem de agregalar arasındaki kenetlenmeyi azaltır (McGennis vd., 1995; WesTrack Forensic Team Consensus Report, 2001).

Yassı ve uzun taneli bir agrega parçacığı için kritik ölçü maksimum ve minimum boyutlarının oranıdır. Mevcut Superpave standartları, yassı ve uzun taneli agregaların, kaba agrega miktarının %10'undan fazla olmasına müsaade etmemektedir. (5:1'den fazla bir orana da müsaade edilmemektedir.) Superpave ASTM metodunda belirtilen 9,5 mm'lik elekten farklı olarak 4,75 mm'lik elek üzerinde kalan malzemeye deneyin yapılmasını öngörmektedir (Advanced Asphalt Technologies, 2011; WesTrack Forensic Team Consensus Report, 2001).

6.2.1.4. Kum eşdeğer

Kum eşdeğeri; AASHTO T 176 ve ASTM D2419 standartlarına göre tayin edilmekte ve ince agrega içerisindeki kil varlığını ifade etmektedir. Kil, karışımın neme duyarlı olmasına ve/veya arazideki tekrarlı sıkıştırmalar neticesinde karışımın yoğunluğunu kaybetmesine neden olabilmektedir.

Deneyde, ince agrega numunesi, içerisinde çözücü bir sıvı bulunan Şekil 6.2' deki gibi ölçekli silindirik bir kaba yerleştirilir ve kap hafifçe çalkalanarak kil taneciklerinin agregadan ayrılması sağlanır. Bu tanecikler çözücü sıvı etkisiyle agrega üzerinde askıda kalır. Uygulanan bu işlemten sonra altta biriken agrega ve askıda kalmış kilin ölçekli kap üzerinde yükseklikleri ölçülür.



Şekil 6.2. Kum eşdeğerlik deneyi (McGennis vd., 1995; Harman vd., 2002; Hossain, 2016)

Kum eşdeğerlik değeri tayininde, kum yüksekliğinin kil yüksekliğine oranı yüzde olarak belirlenir ve bu değer Çizelge 6.8’ de verilen şartname kriterlerini sağlamalıdır.

Çizelge 6.8. Kil içeriği kriterleri (Cominsky, 1994; FHWA, 1997; Garber ve Hoel, 2009)

Trafik (ETDY) (milyon)	Kum eşdeğerliliği, (min. %)
< 0,3	40
<1	40
<3	40
<10	45
<30	45
<100	50
≥100	50

Kum eşdeğer değerlerinin yüksek olması arzu edilir. Bu durum agreganın kil parçacıkları ve toz açısından nisbeten temiz olduğunu gösterir (Advanced Asphalt Technologies, 2011).

6.2.1.5. Agregasertliği (Los Angeles aşınma) (AASHTO T 96, ASTM C535 ve C131)

Çok sert agregas içeren (mohs sertliği 7 veya daha fazla) karışımlar VMA kriterlerini karşılamak hususunda bir problem yaratmamaktadır. Bazalt gibi çok sert agregalar, laboratuvardaki sıkıştırma veya BSK plentindeki karıştırma esnasında kolay kolay parçalanmamakta ve bu agregalar VMA'sı yeterli olan karışımlar oluşturabilmektedir (WesTrack Forensic Team Consensus Report, 2001).

Kireçtaşının bazı tiplerinde olduğu gibi mohs sertliği 5 civarında olan yumuşak agregalar, yoğurmalı sıkıştırma işlemi esnasında sıklıkla aşınmakta, bu durum tasarım aşamasında VMA kriterlerinin karşılanmasını güçleştirmektedir. Üretim esnasında, sıcak karışım plentinde agregalar yoğurmalı sıkıştırıcı ile laboratuvardaki tasarım sürecinden daha fazla aşınabilmektedir. Agregalar fazla aşındığından, karışımda daha fazla ince malzeme oluşur ki bu durum VMA'yı düşürür. Plentte üretilen karışımın minimum VMA kriterlerini sağlaması oldukça önemlidir. Yumuşak agregalarla tasarlanan karışımlar, tasarım aşamasında ve özellikle üretim esnasında VMA kriterlerini karşılama konusunda problem yaratmaktadır. Yumuşak ve sert agregalarla üretilen karışımlar için de VMA kriterlerini karşılama konusunda aynı durum söz konusu olabilmektedir (WesTrack Forensic Team Consensus Report, 2001).

6.2.1.6. Don dayanımı (AASHTO T 104)

Donma olayı agregaları yıpratan bir dış etkidir. Donan su hacmini %9 arttırmaktadır. Agregas gözeneklerine önceden giren su, donma ısısına ulaştığında hacmini artırarak donmaktadır. Böylece agregada içten bir basınç oluşmakta, kılcal çatlama ve parçalanma başlamaktadır.

Agreganın maruz kaldığı soğuk havaya karşı direnci sodyum sülfat (Na_2SO_4) veya magnezyum sülfat (MgSO_4) deneyi ile ifade edilir. MgSO_4 ile deney gerçekleştirildiğinde, kayıp aşınma tabakası için %16, binder tabakası için ise %18'den fazla olmamalıdır (KTŞ, 2013).

6.2.1.7. Zararlı maddeler (AASHTO T 112, ASTM C142)

Agrega içerisinde zararlı maddelerin varlığı istenmeyen bir durumdur. Zararlı maddeler; bitkiler, kil toprakları, şeyl, mika gibi AASHTO T 112 veya ASTM C142 standartları ile ölçülebilen maddelerdir. Standartlarda agreganın kırımı esnasında oluşan aşırı tozun uzaklaştırılmasından da bahsetmektedir. Agreganın yıkanması, aşırı toz ve zararlı maddelerin agreganın bünyesinden uzaklaştırılmasını sağlamaktadır. Kaba agreganın içerisindeki kil toprakları ve ufalanabilir danelerin miktarı % 0,3'den az olmalıdır (Lavin, 2003; KTŞ, 2013).

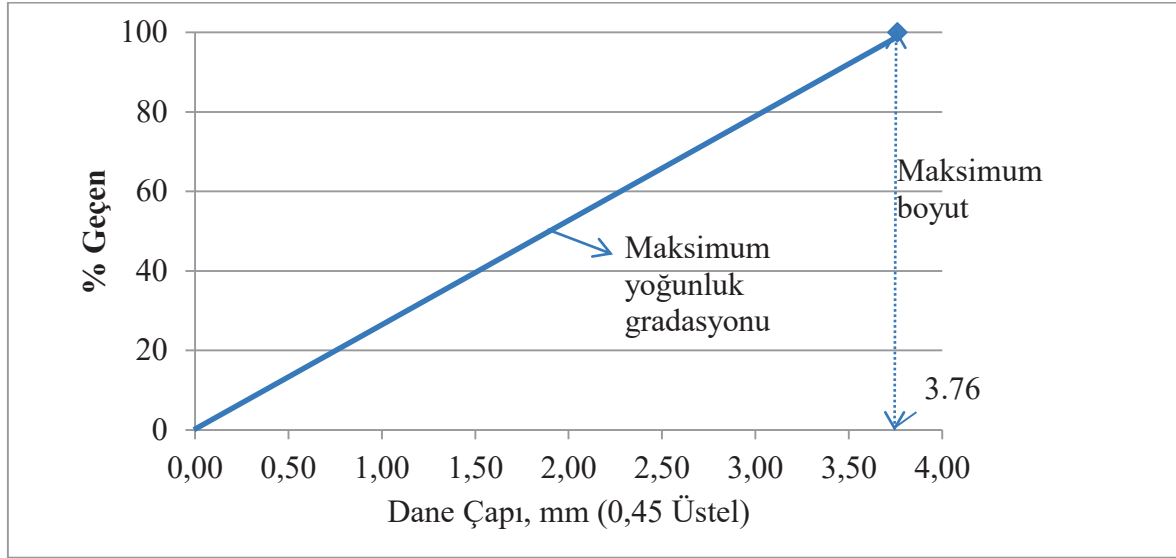
6.2.1.8. Gradasyon (Dane dağılımı)

Superpave sisteminde uygun gradasyonu belirlemek için “0,45 kuvvet” gradasyon grafiği kullanılır. Geleneksel yöntemlerde ise, gradasyon grafiği ile düşeyde % geçen aritmetik ölçekte ve yatayda elek boyutu logaritmik ölçekte hazırlanıp bunun üzerinde agreganın karışımının kümülatif dane dağılımı belirlenir. Yatayda elek boyutları mm cinsinden 0,45 kuvvet değeri ile belirlenir. 19 mm elek boyutu 3,76 olarak gösterilmelidir (FHWA, 1997; Garber ve Hoel, 2009). Elek boyutları ve 0,45 üsleri Çizelge 6.9’ da gösterilmiştir.

Çizelge 6.9. Elek boyutları ve 0.45 üsleri (Harman vd., 2002)

Agrega	Elek (inç)	Elek (mm)	0,45 Üssü (X) ^{0,45}
KA	3/4 "	19	3,76
KA	1/2 "	12,5	3,12
KA	3/8 "	9,5	2,75
KA	# 4	4,75	2,02
İA	# 8	2,36	1,47
İA	# 10	2,0	1,37
İA	# 16	1,18	1,08
İA	# 30	0,6	0,79
İA	# 40	0,42	0,68
İA	# 50	0,3	0,58
İA	# 80	0,18	0,46
İA	# 100	0,15	0,43
MF	# 200	0,075	0,31

0,45 kuvvet grafiği Şekil 6.3’ de belirtilen maksimum yoğunluktaki dane dağılımını ifade eder. Bu yoğunluk; orijinden maksimum agrega boyutuna çizilen doğru ile elde edilir (Tunç, 2007).



Şekil 6.3. 19 mm maksimum boyut için maksimum yoğunluk gradasyonu (FHWA, 1997; Hossain, 2016)

Superpave tasarımında maksimum boyut, nominal maksimum boyut, yasaklanmış bölge ve kontrol noktaları ifadeleri yer almaktadır. Nominal maksimum boyut, agrega malzemesinin %10’dan fazlasının üstte kaldığı (veya %90’ının geçtiği) ilk eleğin bir üst elek boyutudur. Maksimum boyut, nominal maksimum boyuttan bir üst elek boyutudur (Garber ve Hoel, 2009).

Superpave tasarımı agregaların uyması gereken agrega elek boyutu kontrol noktaları içerir. Bu sınır noktaları, nominal maksimum elek, orta elek (2,36 mm) ve en küçük boyutlu (0,075 mm) eleklerin bulunduğu yerlerde belirlenmiştir. Kontrol noktaları Çizelge 6.10’da özetlenmiştir.

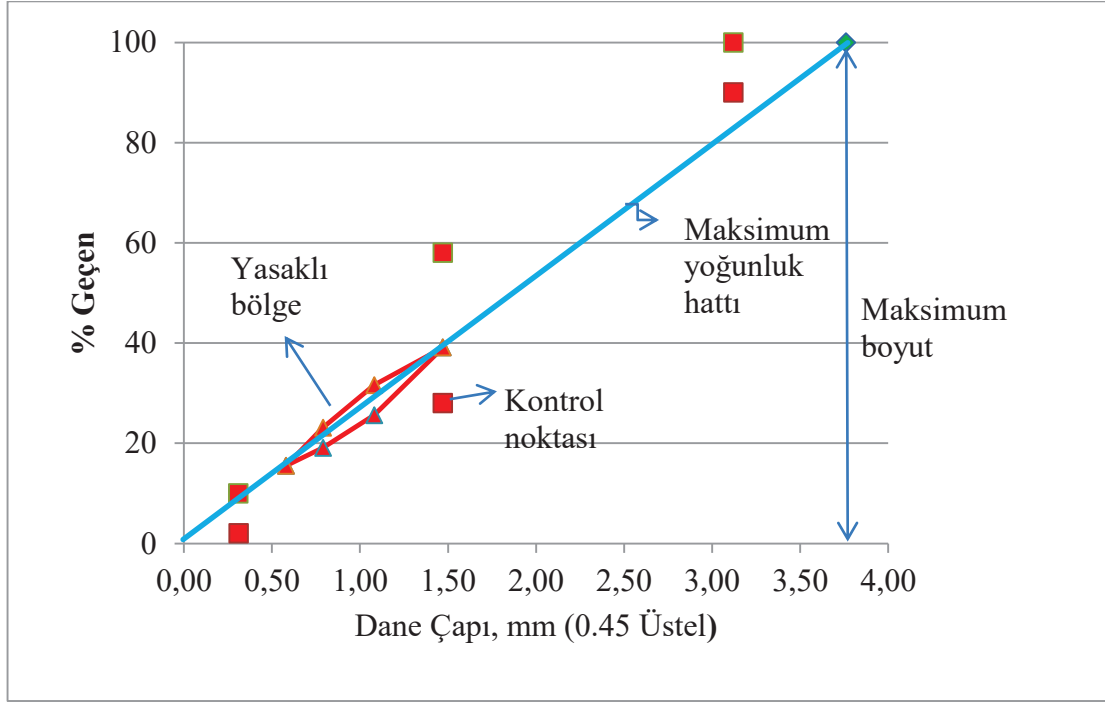
Ayrıca gradasyon eğrisinin geçmemesi gereken yasaklı bir bölge mevcuttur. Şekil 6.4’ de görülebilen bu alan maksimum yoğunluk çizgisinin her iki tarafında bir alanı kapsamaktadır (Tam, 2006).

Çizelge 6.10. Superpave karışımlarda agrega gradasyon kontrol noktaları (Hunter vd., 2015; Harman vd., 2002; Tam 2006)

Agrega Gradasyon Kontrol Noktaları (% geçen)										
Elek(mm)	9,5mm karışım		12,5 mm karışım		19 mm karışım		25 mm karışım		37,5 mm karışım	
	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.
50	-	-	-	-	-	-	-	-	100	-
37,5	-	-	-	-	-	-	100	-	90	100
25	-	-	-	-	100	-	90	100	-	90
19	-	-	100	-	90	100	-	90	-	-
12,5	100	-	90	100	-	90	-	-	-	-
9,5	90	100	-	90	-	-	-	-	-	-
4,75	-	90	-	-	-	-	-	-	-	-
2,36	32	67	28	58	23	49	19	45	15	41
1,18	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,075	2	10	2	10	2	8	1	7	0	6

Yasaklanmış bölge; maksimum yoğunluk hattı üzerinde ve maksimum boyuta bağlı olarak 4,75 mm veya 2,36 mm ile 0,3 mm elekler arasında bir band şeklindeki bölgedir. Bu tip gradasyon, bünyesinde çok fazla kum veya ince malzeme ihtiva ettiğinden yapım sırasında sıkıştırma zorluğuna ve sonrasında kalıcı deformasyonlara neden olmaktadır.

Yasaklanmış bölge, ince agrega boyutunda gradasyon eğrisinin maksimum yoğunluk hattına yakın ve paralel geçmesini engeller ve bu hattan uzaklaşmayı gerektirir. Çünkü maksimum yoğunluk gradasyonu, genellikle yetersiz agregalar arasındaki boşluk oranını (VMA) sağladığı ve bu boşluklar içerisine yetersiz miktarda bitüm gireceğinden karışımın durabilitesi azalır. Superpave karışımlar için yasaklı bölge sınırları Çizelge 6.11’de verilmiştir.

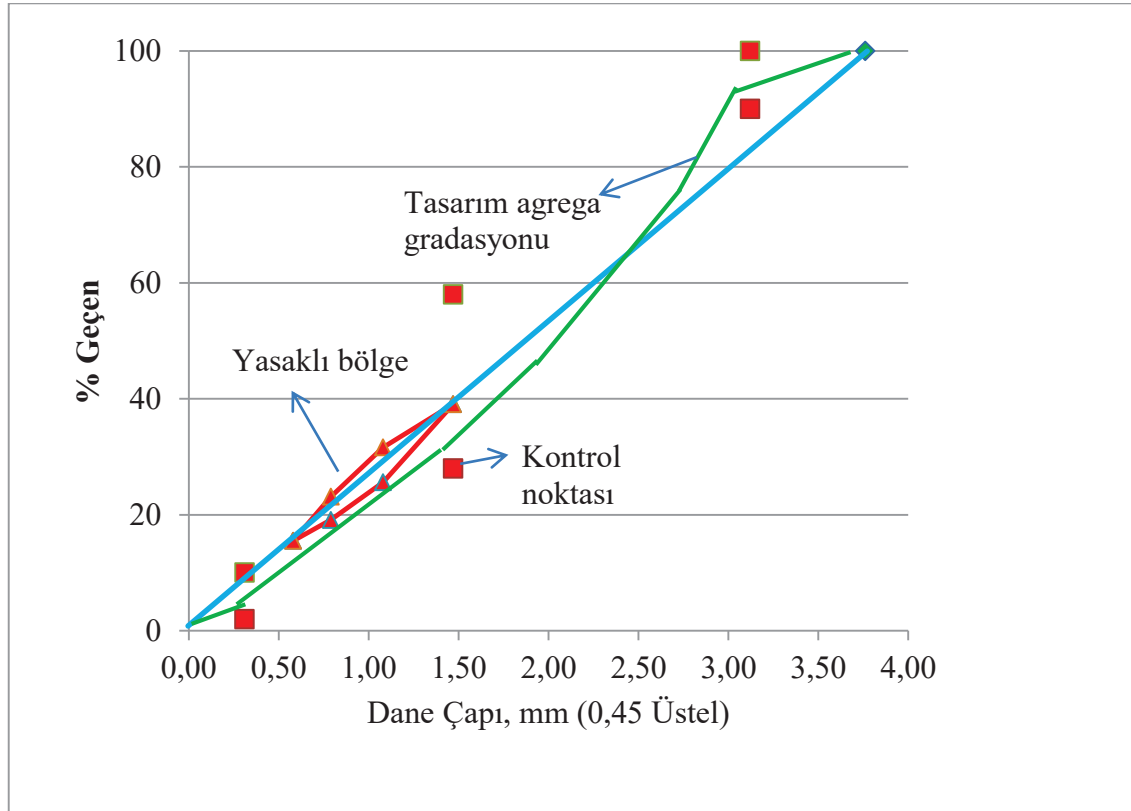


Şekil 6.4. 19 mm maksimum boyut için Superpave gradasyon limitleri (FHWA, 1997; Tam 2006)

Superpave tasarımında, agrega dane büyüklüklerinin kümülatif dağılımını tanımlamak amacıyla tasarım agrega gradasyonu terimi kullanılmaktadır. Yasaklanmış bölgeden geçmeden, kontrol noktaları arasından geçen tasarım agrega gradasyonu Şekil 6.5’ de görüldüğü gibi Superpave agrega gradasyon şartlarını sağlamaktadır.

Çizelge 6.11. Superpave karışımlar için yasaklı bölge sınırları (Harman vd., 2002; Tam, 2006)

Yasaklı Bölge Sınırları (% geçen)										
Elek(mm)	9,5mm karışım		12,5 mm karışım		19 mm karışım		25 mm karışım		37,5 mm karışım	
	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.
4,75	-	-	-	-	-	-	39,5	39,5	34,7	34,7
2,36	47,2	47,2	39,1	39,1	34,6	34,6	26,8	30,8	23,3	27,3
1,18	31,6	37,6	25,6	31,6	22,3	28,3	18,1	24,1	15,5	21,5
0,60	23,5	27,5	19,1	23,1	16,7	20,7	13,6	17,6	11,7	15,7
0,30	18,7	18,7	15,5	15,5	13,7	13,7	11,4	11,4	10,0	10,0



Şekil 6.5. Superpave tasarım agrega gradasyonu (FHWA, 1997; Tam 2006)

6.2.2. Superpave bitüm şartnamesi

Superpave performans sınıfı bitüm şartnamesi (AASHTO MP1) belirli kaplama sıcaklıklarında tekerlek izi, yorulma çatlakları ve düşük sıcaklık çatlaklarına dayanıklı bitüm kullanılmasını esas almaktadır. Bitüm sınıfı, inşaatın yapılacağı bölgedeki yüksek ve düşük tasarım kaplama sıcaklıkları ile istenen güvenilirlik (emniyet) esas alınarak seçilir. Belirli bir proje için kullanılacak bitüm sınıfını seçmek için en yaygın metot, tasarım hava sıcaklığı aralığına karar vermek ve buna bağlı olarak tasarım kaplama sıcaklıklarını tespit etmektir. Kullanılacak bitüm sınıfını seçmeden önce, tasarım mühendisi trafik hacmi ve hızını dikkate almaz (WesTrack Forensic Team Consensus Report, 2001).

Bitüm sınıfının belirlenmesinde güvenilirlik, maliyet ve trafik seviyeleri gibi faktörler dikkate alınır. PG 64 sınıfı bitüm yüksek sıcaklıklarda % 94 güvenilirlik sağlıyorsa, %98 güvenilirlik elde etmek için PG 70 sınıfı bitüm seçilmesi ekonomik olmayabilir. Fakat PG 64 bitüm sadece %52 güvenilirlik sağlıyorsa, %98 güvenilirliğin elde edilebilmesi için PG 70 bitümün seçilmesi uygun olacaktır (WesTrack Forensic Team Consensus Report, 2001).

Trafik hacimlerine ilişkin; tasarım trafik hacmi 10 milyon eşdeğer dingil yükünü aştığında, Superpave yüksek sıcaklık bitüm sınıfında artışın değerlendirilmesini önermektedir. Tasarım trafik değeri 30 milyon eşdeğer dingil yükünden fazla olduğunda, Superpave yüksek sıcaklık bitüm sınıfında bir kademe artış yapılmasını öngörmektedir. Trafik hızlarına ilişkin, yavaş trafikler için (20-70 km/sa) Superpave yüksek sıcaklık bitüm sınıfının bir kademe arttırılmasını, duran trafik (<20 km/sa) durumlarında ise iki kademe arttırılmasını önermektedir (WesTrack Forensic Team Consensus Report, 2001).

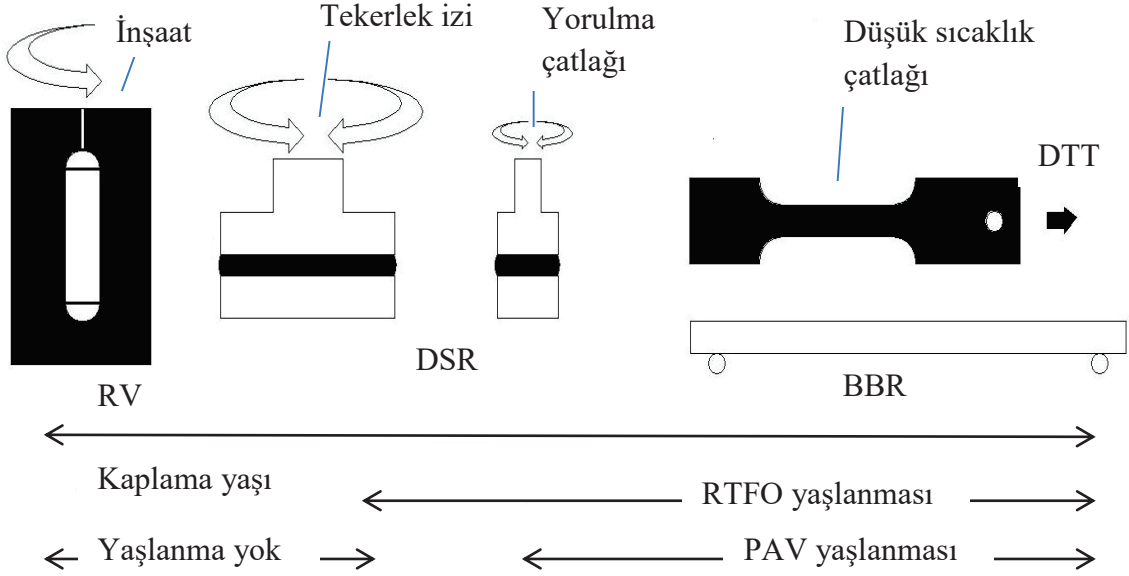
Superpave performans sınıfı bitüm deneyleri, asfalt beton kaplamadaki bitümün üretim ve hizmet ömrü boyunca karşılaşılabileceği sıcaklıkların dikkate alınabilmesi ve geniş bir sıcaklık aralığında deneylerin gerçekleştirilmesine imkân vermektedir. Geleneksel yöntemler bitümün sadece 25°C ve 4°C sıcaklıkta gerçekleştirilen birkaç deney ile fiziksel özelliklerinin tayinine imkân veremekteydi. Asfalt beton kaplamalar sıklıkla çok düşük sıcaklıklara maruz kaldığından, BBR ve direkt çekme deneyleri ile düşük sıcaklıklarda bitümün fiziksel özelliklerinin tayin edilebilmesi önemli bir ilerlemedir (Asphalt Institute, 2007).

Yüksek sıcaklık sınıfı bir kademe arttırıldığında, bitümün rijitliğinin yaklaşık olarak iki katına çıkacağı göz önünde bulundurulmalıdır. Bir başka deyişle, PG 70 bitüm 64°C sıcaklıkta PG 64 bitüme göre iki kat daha rijit olacaktır. Buna ilaveten, 64°C sıcaklıkta PG 76 bitüm PG 64 sınıfı bitüme göre dört kat daha sert olacaktır. Kaplamadaki bitümün rijitliğinde trafik hızlarının da etkisi olmaktadır. 100 km/sa hızda trafiği taşımaya kıyasla 50 km/sa hızda, bir bitümün görünen rijitliği daha az olacaktır (WesTrack Forensic Team Consensus Report, 2001).

6.2.3. Performansa dayalı bitüm deneyleri

Bitümün performans özelliklerini belirlemek için; Dönel Viskozimetre (RV), Dinamik Kesme Reometresi (DSR), Kiriş Eğme Reometresi (BBR) ve Doğrudan Çekme Testi (DTT) deneyleri gerçekleştirilmektedir. Ayrıca bitümün kısa dönem yaşlanmasını temsilen Dönel İnce Film Etüvü (RTFOT), uzun dönem yaşlanmasını temsilen ise Basıncılı Yaşlandırma Kabı (PAV) deneyleri gerçekleştirilmektedir.

Bitüm üzerinde gerçekleştirilen performans deneyleri ve ifade ettikleri BSK evreleri Şekil 6.6’ da gösterilmiştir.



Şekil 6.6. Bitüm deneyleri ve BSK evreleri (Druta, 2006; MAPA, 2014; FHWA, 1997)

6.2.3.1. Dönel viskozimetre (RV) deneyi

Dönel viskozimetre deneyi; bitümün sıcak karışım esnasında yüksek sıcaklıkta pompalanabilme ve işlenebilmesi için akma özelliklerinin tayini amacıyla kullanılır. Deney, EN 13302, AASHTO T 316 veya ASTM D4402 ve D2196'ye uygun olarak yürütülür.

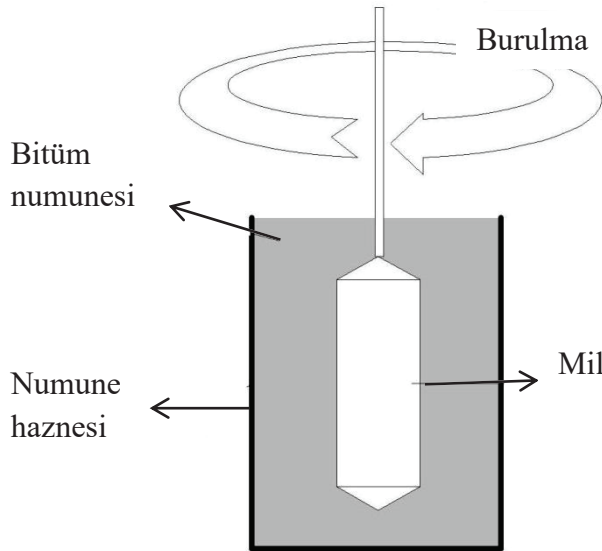
Dönel viskozimetre, normal ve modifiye bitümler, emülsiyonlar ve katbek bitümlerin dinamik viskozitesinin tayininde kullanılır. Normal ve modifiye bitümler için deney sıcaklıkları 90°C ile 180°C arasında değişir. Normal bitümler için deney sıcaklıkları genellikle 90°C, 105°C ve 135°C, polimer modifiye bitümler için ise 135°C, 150°C ve 165°C'dir (Nikolaides, A., 2015).

Viskozite; bitümlerin sınıflandırılmasında kullanılan önemli bir kriterdir. BSK'larda, bitümün agrega ile karıştırılma ve yola serilip sıkıştırılma esnasında belirli akıcılıkta olması gerekir. Aksi halde hem agrega ile yeterli derecede bağlanamaz (eksik

adezyon kuvveti) hem de karışım yola serildikten sonra yeterli oranda sıkıştırılamaz (Arslan, 2010).

Deneyde, sabit sıcaklıktaki bitüm numunesi içerisine daldırılan silindirik milin sabit bir rotasyonel hızda dönebilmesi için gerekli olan tork'un ölçülmesi suretiyle viskozite değeri tayin edilir. Deney şeması Şekil 6.7' de görüldüğü gibidir.

Dönel viskozimetreler sıvı içerisindeki nesneyi sabit bir hızla döndürebilmek için gerekli olan torkun, o sıvının viskozitesinin bir fonksiyonu olduğu prensibine dayanır. Dönel viskozimetreler normalde bitümün uygulama sıcaklıklarındaki viskozitesinin tayini için kullanılır. Bitüm dönel viskozitesi genellikle 135 ve 150°C sıcaklıkta belirlense de, bu düzeneikle oldukça geniş bir sıcaklık aralığında (120 ve 180°C gibi) viskozitenin tayini mümkün olmaktadır (Hunter vd., 2015).

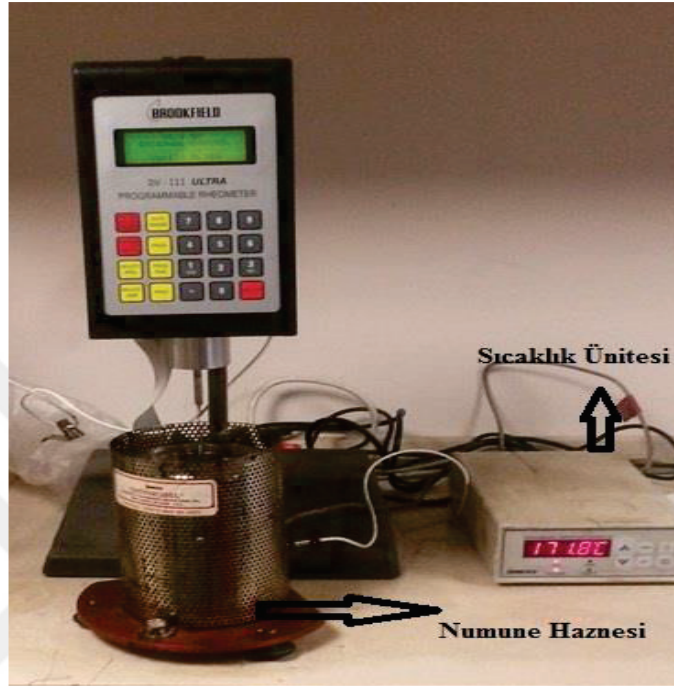


Şekil 6.7. Dönel viskozimetre (RV) deney şeması (FHWA, 1997; Loh ve Olek, 1999; Asphalt Institute, 2007; Tunç, 2007; Papagiannakis ve Masad, 2008)

Dönel viskozimetre deneyinde, bitüm numunesi silindirik çelik bir tüp içerisine konulur ve bu tüp önceden ısıtılmış, ısı kontrollü numune haznesine yerleştirilir. Deneyde kullanılacak bitüm, mil'in boyutlarına göre 8-11 gram arasındadır.

Sıcaklık ünitesi numune sıcaklığını 38-260°C ($\pm 1,0$ °C) arasında muhafaza edebilecek kapasitede olmalıdır. Numune haznesi ve kullanılacak mil deneyler öncesinde en az 15 dakika ısıtılmalıdır. Numune haznesine yerleştirilen bitüm numunesi 30 dakika

içerisinde istenilen sıcaklığa getirilir ve ilk ölçüm alınmadan önce en az 10 dakika bekletilir. Viskozite veya tork 1 dakikalık zaman aralıkları ile 3 dakika boyunca ölçülerek not edilir. Brookfield viskozite deney cihazı Şekil 6.8’ de gösterilmiştir.



Şekil 6.8. Brookfield viskozite cihazı

Deney esnasında bilgisayar ekranından okunan tork yüzdesi %2’den düşükse veya % 98’den fazla ise farklı ebatta mil kullanılması gerekmektedir. Sıcaklık sabit bir değere ulaştıkça, viskozite okumaları da sabit hal almaktadır (Asphalt Institute, 2007).

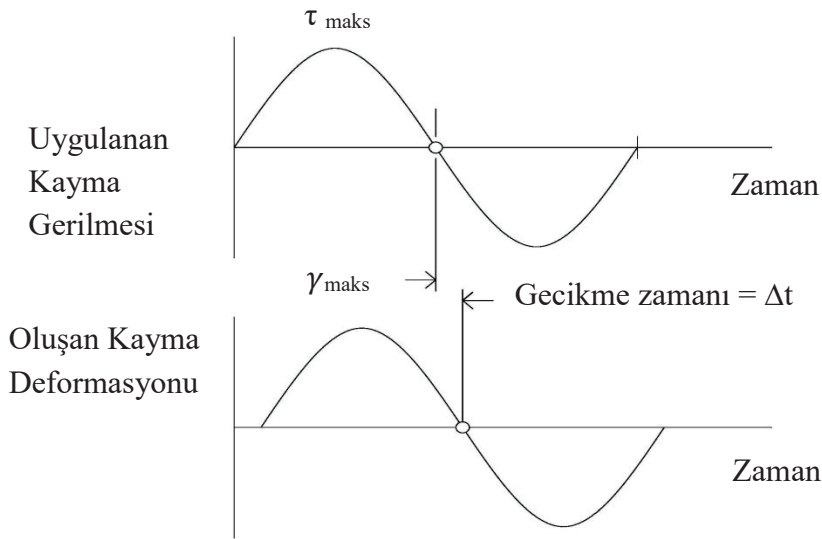
6.2.3.2. Dinamik kesme reometresi (DSR) deneyi

DSR, performansa dayalı bitüm şartnamesinde belirtilen üç üstyapı bozulmasından ikisine yönelik bitümün direncinin tayini için kullanılır. Kalıcı deformasyon direnci; normal ve RTFO ile yaşlandırılmış, yorulma çatlak direnci ise PAV ile yaşlandırılmış bitüm üzerinde ölçülmektedir. Deney uygulaması için EN 14770, AASHTO T 315, ASTM D7175 standartları kullanılır (Lavin, 2003).

DSR bitümün orta sıcaklıklardan yüksek sıcaklıklara kadar kompleks kayma modülü (G^*) ve faz açısı (δ) da dahil olmak üzere reolojik özelliklerinin tayininde kullanılır. Bu parametreler bitümün hem viskoz hem elastik davranışını karakterize etmek

için kullanılabilir. Kompleks kayma modülü, G^* , malzeme sinüsoidal kayma gerilmesine maruz bırakıldığında deformasyona karşı gösterdiği toplam direncin ölçüsüdür. G^* , hem elastik (geri dönüşümlü), hemde viskoz (geri dönüşümsüz) bileşenleri içerir. Bitümlerin G^* ve δ değerleri, deney sıcaklığı ve yükleme sayısı ile büyük oranda ilişkilidir (Loh ve Olek, 1999; Asphalt Institute, 2007).

Faz açısı, δ , viskoz ve elastik deformasyonun bağıl miktarlarının göstergesidir ve uygulanan gerilme ile meydana gelen deformasyon arasındaki zaman aralığına (Δt) eşit olmaktadır. Bir başka deyişle, faz açısı bitümün akışkanlığının bir göstergesidir. Faz açısı ne kadar yüksek ise, bitüm o oranda akışkan demektir. Viskoelastik malzemelerde gerilme-deformasyon ilişkisi Şekil 6.9'da gösterilmiştir (Advanced Asphalt Technologies, 2011).

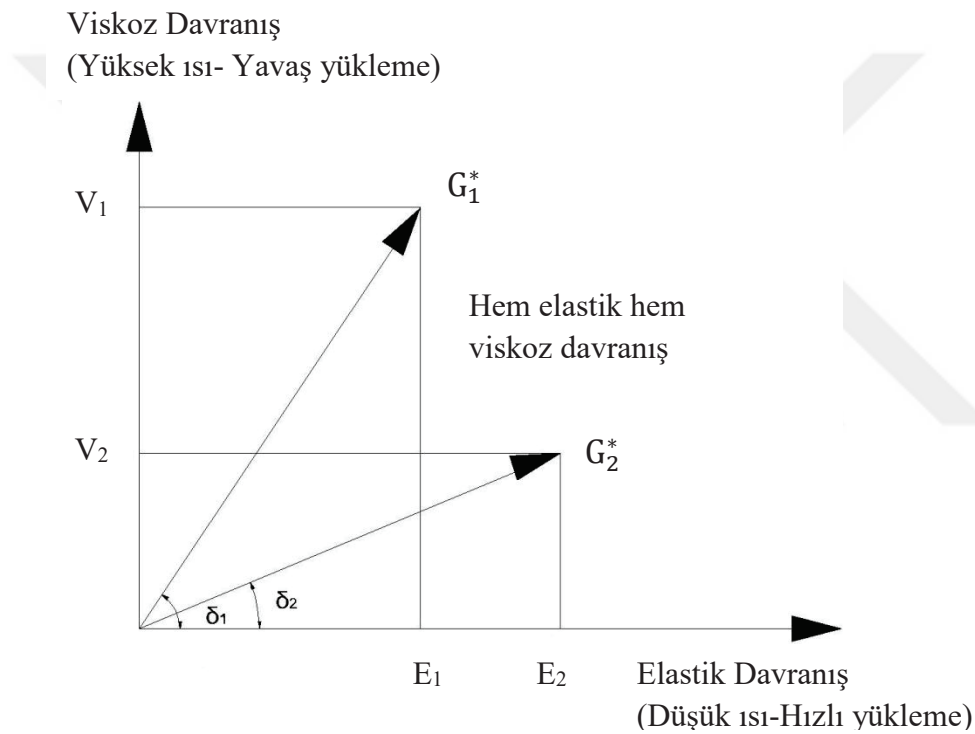


Şekil 6.9. Viskoelastik malzemelerde gerilme-deformasyon ilişkisi

$$G^* = \frac{\tau_{maks}}{\gamma_{maks}} \quad (6.1) \text{ olarak hesaplanır.}$$

DSR aleti 1kPa ile 10 MPa aralığında G^* ve 0° ile 90° aralığında δ 'yı tayin edebilecek özelliklerde olmalıdır. Faz açısı küçüldükçe bitümün elastik davranış özelliği, büyüdükçe viskoz davranış özelliği artar. Faz açısının 0° olması malzemenin tamamıyla elastik özellikte olduğunu, 90° olması ise tamamen viskoz özellikte olduğunu ifade eder.

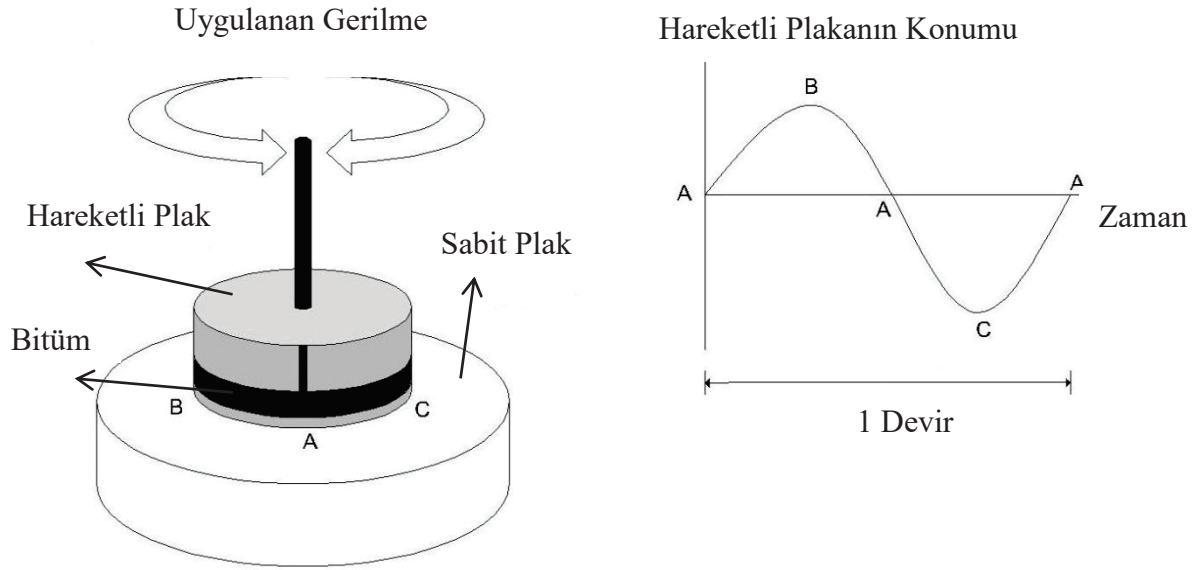
Normal kaplama sıcaklıkları ve trafik yüklerinde, Şekil 6.10'da gösterildiği üzere, bitüm hem viskoz sıvı, hem de elastik katı gibi davranır, bu nedenle viskoelastik malzeme olarak adlandırılır. Yüksek sıcaklıklarda, bitüm geri dönüşüm kapasitesi az olan viskoz akışkanlar gibi davranır. Şekilde G_1^* ve G_2^* sırasıyla bitüm (1) ve (2) için kompleks kayma modülü değerlerini temsil etmektedir. Her iki bitüm yüklendiğinde, deformasyonlarının bir kısmı elastik (E), bir kısmı ise viskoz (V)'dur. Her iki bitüm de viskoelastik olmasına ve aynı G^* değerine sahip olmasına rağmen, faz açısı daha küçük olan (2) numaralı bitüm (1) numaralı bitüme göre daha elastiktir (Asphalt Institute, 2007).



Şekil 6.10. Viskoelastik davranış (FHWA, 1997; Asphalt Institute, 2007)

$G^*/\sin \delta$ bitümün tekerlek izi direnç parametresidir. Bu değer yüksek olması bitümün tekerlek izi oluşumuna karşı daha dirençli olduğunu gösterir. Performans sınıfı bitüm şartnamesine göre $G^*/\sin \delta$ değeri yaşlandırılmamış bitümler için minimum 1 kPa, yaşlandırılmış bitümler için ise minimum 2,2 kPa olmalıdır. Deney esnasında bitüm sıcaklığı minimum $G^*/\sin \delta$ ve maksimum $G^* \cdot \sin \delta$ değerleri karşılanıncaya kadar 6°C aralıklarla arttırılmaktadır (Loh ve Olek, 1999; Advanced Asphalt Technologies, 2011).

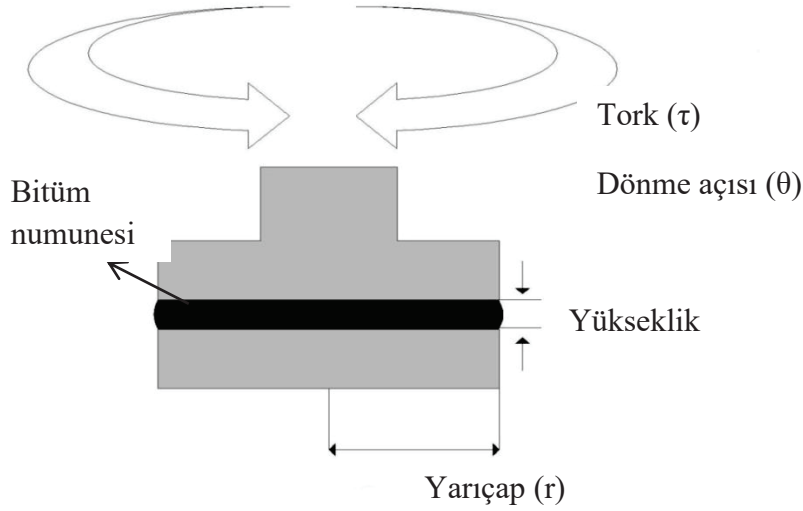
DSR deneyinde bitüm birbirine paralel iki plaka arasına yerleştirilir. Altındaki plaka sabit, üstteki ise hareketlidir. Deney düzeneği Şekil 6.11’ de görülmektedir. Üstteki plaka A noktasından B’ye, B’den tekrar A’ya, A’dan C’ye ve C’den tekrar A noktasına hareket eder. Bu harekete salınım (devir) denir ve deney süresince bu salınım hareketi devam eder (Hossain, 2016).



Şekil 6.11. DSR deney şeması (FHWA, 1997; Zaniwski ve Pumphrey 2004; Asphalt Institute, 2007; Tunç,2007; Papagiannakis ve Masad, 2008; Hossain, 2016; Druta, 2006)

Paralel plak kullanılması halinde 5°C ile 85 °C sıcaklık aralığındaki bitüm için 0,5 mm-2,0 mm açıklık ayarı yapılmasının uygun olacağı değerlendirilmektedir. 25 mm plaklar için 1 mm, 8 mm plaklar için ise 2 mm değerleri tavsiye edilmektedir. DSR deneyinde bitüm numunesi yerleşimi Şekil 6.12’de gösterilmiştir (Loh ve Olek, 1999; Garber ve Hoel, 2009).

0-30°C gibi düşük sıcaklıklarda numuneler üzerinde deneyin gerçekleştirilebilmesi için 8 mm, 40-90°C gibi yüksek sıcaklıklarda ise 25 mm’lik plak kullanılması gerekmektedir. Deneyde normal (yaşlandırılmamış) ve kısa dönem yaşlandırılmış bitüm için 25 mm çapındaki plaka, uzun dönem yaşlandırılmış bitüm için ise 8 mm çapındaki plaka kullanılır.



Şekil 6.12. DSR deneyinde bitüm numunesi yerleşimi (Papagiannakis ve Masad, 2008)

Plak çapının seçilmesinde, Çizelge 6.12’de gösterildiği üzere, cihazın kesme kuvveti uygulama kapasitesi ile ilintili olan bitümün kompleks kayma modülü (G^*) değerleri esas alınmaktadır.

Çizelge 6.12. SHRP plak geometrisi şartnamesi (Singh, 2016)

Plak çapı	Deney sıcaklık aralığı	G^* aralığı
(mm)	(°C)	(Pa)
8	0-40	$10^5 - 10^7$
25	40-80	$10^3 - 10^5$
40	> 80	10^3

DSR, açısal rotasyon ve uygulanan tork olmak üzere iki temel parametreyi ölçmektedir. Diğer bütün parametreler, ölçülen bu iki parametre esas alınarak farklı formüller yardımıyla hesaplanır. Gerilme ve şekil değişiminin hesaplanmasında aşağıda verilen denklemlerden yararlanılmaktadır: (Singh, 2016)

$$\tau = \frac{2T}{\pi r^3} \quad (6.2)$$

$$\gamma = \frac{\theta * r}{h} \quad (6.3)$$

$$\tau = G * \gamma \quad (6.4)$$

Burada;

τ : gerilme, (Pa)

T : tork,

r : plak yarıçapı, (4 veya 12,5 mm)

γ : şekil değişimi, (%)

θ : plak dönüş açısı, (radyan)

h : numune kalınlığı (plaklar arası açıklık), (1 veya 2 mm)

G : kayma modülü (Pa)'dür.

Deneyde açısal yükleme frekansı 10 rad/s olarak ayarlanır. Eğer deney kontrollü gerilme veya şekil değişimi yöntemi ile gerçekleştirilecek ise, kayma gerilmesi ve kayma şekil değişimi büyüklüğü sırasıyla ayarlanır. Kayma gerilmesi ve kayma şekil değişimi için hedef girdi değerleri bitüm tipine bağlı olmakla beraber, Çizelge 6.13'de gösterildiği gibidir (Zaniewski ve Pumphrey, 2004).

Çizelge 6.13. Hedef kayma gerilmesi ve şekil değişimi değerleri (Zaniewski ve Pumphrey, 2004).

Bitüm tipi	Hedef kayma şekil değişimi	Hedef kayma gerilmesi
	(%)	(kPa)
Normal	12	0,12
RTFO	10	0,22
PAV	1	50

Bitüm özellikleri sıcaklığa bağlı olduğundan, DSR deneyi numunenin sıcaklık kontrolü açısından hatasız olmalıdır. Sıcaklık kontrolü, su banyosundan sirküle edilen su veya ısıtıcı ünitelerden verilen basınçlı hava yardımıyla sağlanır. Her şekilde, numune sıcaklığı üniform olmalı ve 0,1 °C'den fazla sıcaklık farkı olmamalıdır. DSR deney cihazı Şekil 6.13'de gösterilmiştir.

Deney öncesi bitümün etüvde yumuşama noktasının 85±5°C üzerinde veya 180°C'de (hangisi düşük ise o kullanılır) ısıtılması gerekmektedir. Bitüm numuneleri hiçbir koşulda ikiden fazla ısıtılmamalıdır. Her ısıtma neticesinde reometre cihazının verdiği değerler belirgin ölçüde değişmektedir. Polimer modifiye bitümler için sıcaklığın tayininde EN 12594'e uygun hareket edilmelidir.



Şekil 6.13. DSR deney cihazı

6.2.3.3. Kiriş eğme reometresi (BBR)

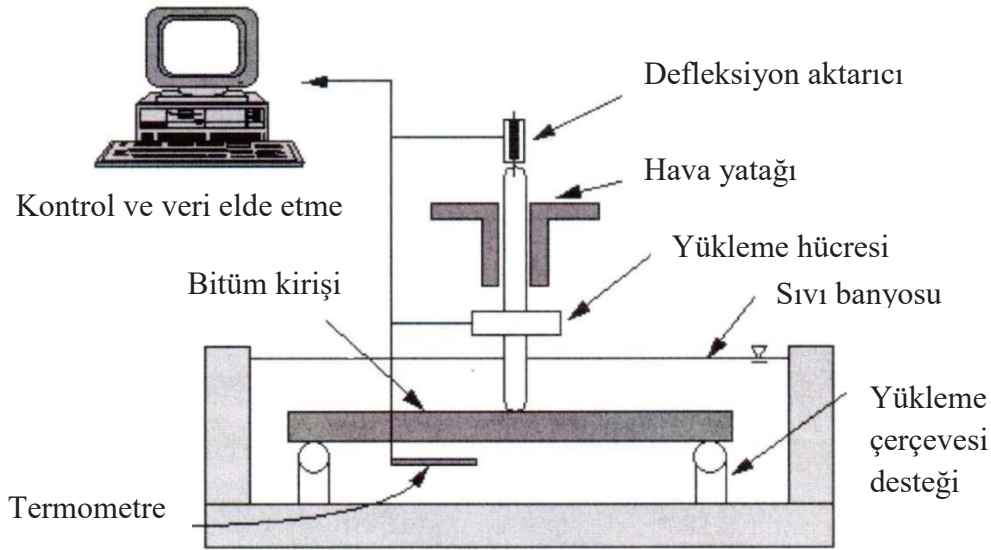
Bu deney metodu kiriş eğme reometresi yardımı ile bitümün esnekliğine ilişkin sünme rijitliği (S) ile sünme oranı olan (m) değerlerinin tayinini kapsar. AASHTO T 313, ASTM D6648 ve EN 14771 standartları kullanılır. BBR deneyinin gerçekleştirilebilmesine yönelik uygulama ise AASHTO TP1’de anlatılmaktadır.

Soğuk iklimli bölgelerde inşa edilen asfalt beton kaplamalarda, yüke bağlı olmayan, ancak iklim ve çevre şartlarından kaynaklanan, termal çatlak olarak isimlendirilen düşük sıcaklık çatlaklarının gözlenmesi amacıyla BBR deneyi geliştirilmiştir. Bu deney, belirli ısıda ve sabit bir yük altında bitümün ne kadar sünme veya defleksiyon yapacağını ölçer ve asfalt beton kaplamanın karşılaşılabileceği en düşük sıcaklıklardaki elastik davranışını belirlemeye çalışır (Zaniewski ve Pumphrey, 2004).

Çevresel soğuma neticesindeki gerilmelerin neden olduğu ısısal büzülme termal çatlaklara yol açar. Çevresel soğuma esnasında, asfalt beton kaplama içerisindeki bitüm sertleşir ve büzülür. Ancak asfalt beton tabaka, daha sıcak kalan veya daha küçük ısısal büzülme katsayısı olan altındaki tabakaların yarattığı sürtünme ile kısıtlanır. Sürtünmenin neden olduğu kısıtlamalar asfalt beton tabaka içerisinde gerilmeler oluşturur. Bu gerilmeler, bitüm yeterli akma değerine sahip olmadığı takdirde, asfalt beton tabakanın çekme dayanımını aşabilir ve dolayısıyla termal çatlaklar ile sonuçlanabilir (Zaniewski ve Pumphrey, 2004).

Bitüm, asfalt beton kaplamanın termal çatlak potansiyeli üzerinde kritik bir rol oynar. Düşük sıcaklıklarda, yüksek rijitlik modülüne sahip olan asfalt beton kaplamalar termal çatlak oluşumuna daha yatkındır (Zaniewski ve Pumphrey, 2004).

Bitümlerin 30 Mpa ile 1 Gpa arasındaki eğilme sünme rijitlikleri kiriş eğme reometresi deneyi ile belirlenmekte olup, deney düzeneği Şekil 6.14’de gösterilmiştir. Eğilme rijitliğinin dışında, m değeri ve eğilme sünme esnekliği ayrıca tayin edilir. Kiriş eğme reometresi deneyi yaşlandırılmamış veya yaşlandırılmış bitüm üzerinde düşük veya çok düşük sıcaklıklarda (-36°C ile 0°C arasında) gerçekleştirilebilir. Asfalt beton kaplamaların düşük sıcaklık çatlak performansı, karışımdaki bitümün sünme rijitliği ve m değeri ile ilişkilidir ASTM D6373 ve AASHTO M 320 standartlarına göre sünme rijitliği ve m değeri, bitümlerin performans esaslı sınıflandırılmasında kriter olarak kullanılmaktadır (Nikolaides, A., 2015).



Şekil 6.14. Kiriş eğme reometresi (BBR) deney şeması (Loh ve Olek, 1999; Hunter vd., 2015)

EN 14771 standardına göre, uygun kalıplarda hazırlanan prizmatik kiriş bitüm numuneleri, üniform sıcaklığa ulaşması açısından 60 dakika boyunca alkol banyosunda bekletilir. Bu süre sonunda, 35 ± 10 mN ön yük uygulanır ve şekil değiştirme ölçülür. Kiriş ters çevrilerek yeniden 35 ± 10 mN yük uygulanır ve şekil değiştirme ölçülür. Eğer iki okuma arasındaki fark 1,0 mm’den küçük ise ortalama alınır ve deneye devam edilir. Sonrasında kiriş numunesi 1 saniye süre ile 980 ± 50 mN yüke maruz bırakılır, sonra yük tekrar 35 ± 10 mN’a düşürülür ve yer değiştirmelerin geri dönmesi için 20 saniye

dinlenmeye bırakılır. Bu periyot sonunda 240 saniye süre ile 980 ± 50 mN yük uygulanır. Kiriş numunelerinde orta noktadaki seğim 4,0 mm'den fazla olduğunda veya 0,08 mm'den az olduğunda, yapılan ölçümler hatalıdır (Loh ve Olek, 1999; Nikolaides, A., 2015; Hossain, 2016).

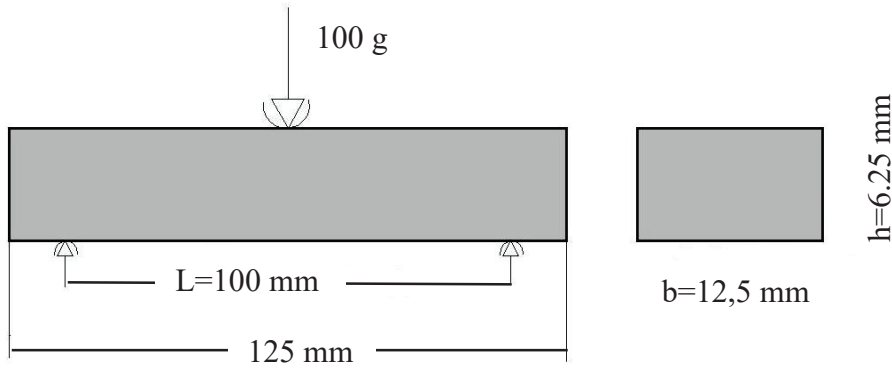
Deneyde PAV cihazı ile yaşlandırılan bitüm, kalıba yerleştirilir. Numune soğuduktan sonra kalıp üzerindeki fazla bitüm sıcak spatula ile traşlanır. Numunenin kalıptan kolay çıkması için, kalıp yaklaşık 60 s süreyle dondurucuda muhafaza edilir. Kalıptan çıkarılan numune hemen deney sıcaklığında hazır olarak bekleyen BBR sıvı banyosu içerisine konulur. Numune kiriş sıvı banyoda 60 dakika süreyle bekletilir ve deney başlatılır. BBR deney cihazı Şekil 6.15'de gösterilmiştir (Zaniewski ve Pumphrey, 2004).



Şekil 6.15. BBR deney cihazı

Kiriş eğme reometresi, Şekil 6.16'da gösterildiği üzere bitümden oluşan prizmatik kirişin orta noktasına sabit bir yük uygulandığında, orta noktasındaki seğim (deflection)'yi ölçmek için kullanılır.

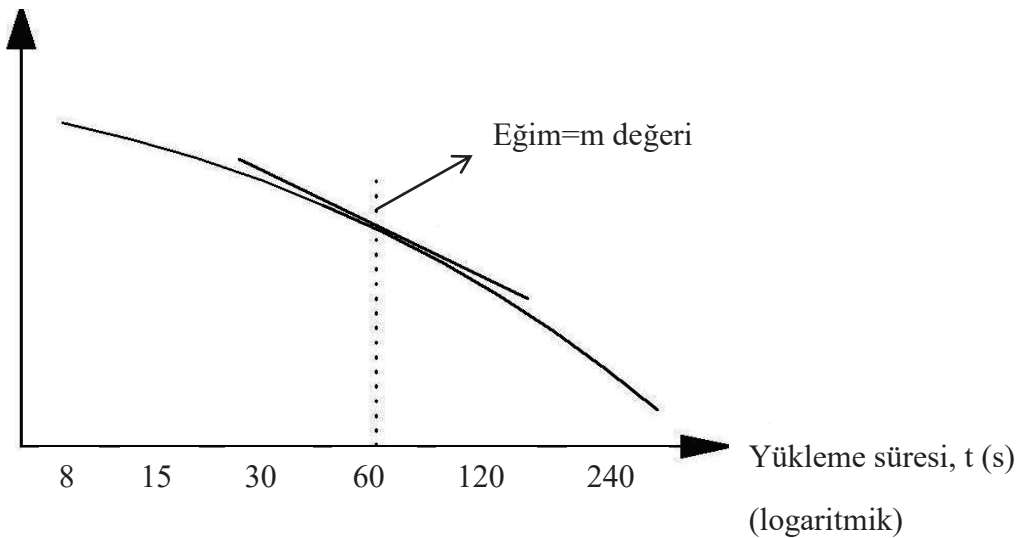
Asfalt beton kaplamaların düşük sıcaklıktaki termal çatlama performansı sünme rijitliği ve karışımdaki bitümün m değeri ile ilişkilidir. Sünme rijitliği, bitümün sünme gerilmelerine karşı gösterdiği direnç, sünme oranı ise yükleme süresince bitümün rijitliğindeki değişim olarak değerlendirilmektedir.



Şekil 6.16. BBR deney numunesi ebatları (Loh ve Olek, 1999; Lavin, 2003; Zaniewski ve Pumphrey, 2004)

Farklı yükleme zamanlarındaki rijitlik ölçülerek elde edilen ve Şekil 6.17’de verilen rijitlik-zaman eğrisinde 60. s’deki teğetin eğimi (m) değeri olarak alınmaktadır. Sıcaklık düştükçe ve termal gerilmeler devam ettikçe, bitümdeki sertlik zamanla değişeceğinden, yüksek (m) değerleri tercih edilmektedir. Yüksek (m) değeri, daha az sert bitüm anlamına geleceğinden, kaplamada oluşacak çekme gerilmeleri azalacak ve termal çatlaklar oluşmayacaktır. Bu nedenle, bitüm şartnamesi 60 s yükleme sonunda (m) değerinin en az 0,300 olması şartını getirmiştir. Superpave şartnamesine göre 60 s yükleme süresi için sünme S değerinin en fazla 300 MPa olması istenmektedir (Advanced Asphalt Technologies, 2011).

Sünme rijitliği, $S(t)$
(logaritmik)



Şekil 6.17. m değer grafiği (Zaniewski ve Pumphrey, 2004; Asphalt Institute, 2007)

Sünme rijitliği (S), numunenin sünme yüklerine karşı gösterdiği dirençtir ve aşağıdaki formül ile hesaplanır: (Hossain, 2016)

$$S(t) = \frac{P \cdot L^3}{4bh^3\delta(t)} \quad (6.5)$$

Burada;

S(t) : t anındaki sünme rijitliği (MPa)

P : deney yükü (980 mN)

L : mesnetler arası mesafe (102 mm)

b : numune genişliği (12,5 mm)

h : numune yüksekliği (6,25 mm)

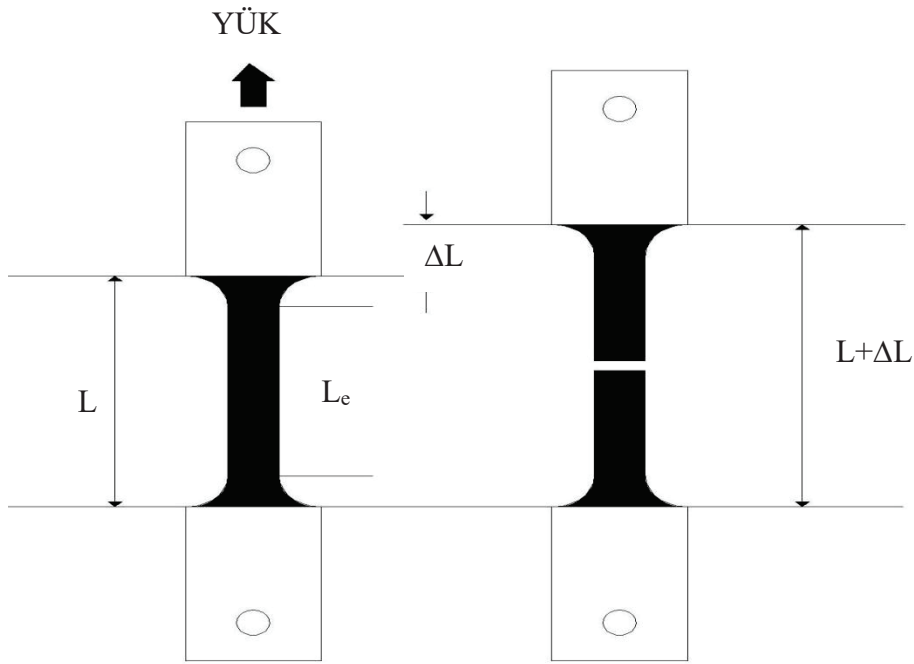
$\delta(t)$: t anındaki seğim (mm)

6.2.3.4. Doğrudan çekme deneyi (DTT)

DTT deneyi normal (yaşlandırılmamış) bitüme uygulandığı gibi RTFOT ve PAV deneyleri ile yaşlandırılmış bitümlere de uygulanmaktadır. ASTM D6723, EN 13587 ve AASHTO T 314 standartlarına uygun olarak uygulanır. ASTM D6723 ve AASHTO T 314'e göre deney sıcaklıkları 0°C ile -36°C arasında değişmekte olup, deney düşük sıcaklıklarda kırılma davranış gösteren bitümlerin performanslarının tespit edilmesinde önemli bir göstergedir (Nikolaides, A., 2015).

ASTM D6723 ve AASHTO T 314'e göre esnek bir silikon lastik içerisinde kemik şeklinde hazırlanan bitüm numunesi, 400-500 N yük uygulanarak iki ucundan 1,0 mm/dak hızla kopma anına kadar çekilir. Kopma anındaki uzunluk, kopma uzaması oranının hesaplanmasında kullanılır. DTT deney şeması Şekil 6.18'de gösterilmiştir.

EN 13587 standardına göre, deney sıcaklık değerleri, -20, -10, -5, 0, 5, 10, 15 ve 20°C, deney hızları ise 1, 10, 50, 100 ve 500 mm/dak'dır (Nikolaides, A., 2015).



Şekil 6.18. Doğrudan çekme deneyi (DTT) şeması (Hicks vd., 2003; Nikolaides, A., 2015; Hossain, 2016; Papagiannakis ve Masad, 2008).

Yapılan araştırmalarda, bitümlerin düşük sıcaklıklarda sertliği (rijitlik) ile kopma anındaki sünme miktarı arasında çok güçlü bir ilişki olduğu görülmüştür. Bitüm, çekme gerilmesine tabi tutulduğunda yeterince sünme gösterirse düktil (sünek) ancak hiç sünme göstermeden koparsa gevrek (kırılgan) olarak isimlendirilir. Sonuçta, bitüm ne kadar rijit ise o kadar gevrek, ne kadar yumuşak ise o kadar düktil davranış gösterir. İdeal bir bitümün düşük sıcaklıklarda sünek davranış göstermesi gerekir. Aksi halde, düşük sıcaklıklarda trafik yüklerinin de etkisiyle kaplamada düşük sıcaklık çatlakları meydana gelmektedir.

Sert ancak düktil özellik gösteren bitümün eğme kirişi deneyi (BBR) sonucunda elde edilen sünme rijitliği değeri 300-600 MPa arasında ise, bitümlere ilave bir gereklilik olarak DTT deneyi uygulanmalıdır. Ancak sünme rijitliği değeri 300 MPa'dan daha az ise, DTT deneyinin yapılmasına gerek kalmamaktadır (Geçkil, 2008).

6.2.4. Bitüm yaşlandırma deneyleri

6.2.4.1. Dönel ince film etüvü (RTFOT)

Plentteki karıştırma işlemi ve serim sırasında yüksek sıcaklık ve hava akışı etkisiyle bitümde kısa dönem yaşlanma olarak adlandırılan olay meydana gelmektedir. Kısa dönem yaşlanmanın laboratuvar ortamında temsil edilmesi için performansa dayalı (PG) bitüm seçimi sisteminde Dönel İnce Film Etüvü Deneyinin (RTFOT) kullanılması gerekmektedir.

Deneyde bitüm EN 12607-1, AASHTO T 240 veya ASTM D2872 standart deney metotları kullanılarak yaşlandırılır. Deney dairesel, dikey ve kendi eksenini etrafında dönen 8 adet numune tüpü yerleştirilebilen bir taşıyıcıya sahip etüv içerisinde yapılır. Deneyde numune silindirlere bulundugu tabla dakikada 15 dönüş yapacak şekilde, 85 dakika süre ile 163 °C sıcaklıkta dönmektedir. Bu esnada numuneler üzerine 4000 ± 300 ml/dak olacak şekilde hava püskürtülür (Loh ve Olek, 1999; Asphalt Institute, 2007; Zaniwski ve Pumphrey, 2004).

RTFOT etüvü deneyden önce 163°C deney sıcaklığında ısıtılır. Eğer 8 numune tüpü de kullanılacak ise, en az 350 g bitüm numunesi istenilen akışkanlığa gelinceye kadar ısıtılır. RTFOT deney tüplerinin her birine 35 g bitüm numunesi konulur. RTFOT şartlandırması esnasında herhangi bir bilgi toplanmaz ancak deney sonucunda bitümdeki kütle kaybı tayin edilebilir. Ortalama kütle kaybı; iki numune tüpünün yaşlandırma öncesinde ve sonrasında tartılması ile tayin edilebilir (Hagos, 2008).

Bitümlerin çoğu artan sıcaklık ve havaya maruz bırakıldığında buharlaşma ve kütle kaybı oluşur. Oda sıcaklığında daha yumuşak olan bitümlerin daha sert olan bitümlere göre daha fazla kütle kaybına uğraması beklenir.

RTFOT ısıtma ile uçucu madde kaybının tespiti ve ısıtmadan sonraki sertleşmiş bitümün fiziksel özelliklerinin tayini için yapılmaktadır. Deney EN 12607-1' e göre gerçekleştirilmektedir. Deney sonucunda;

$$\text{Kütle Kaybı (\%)} = \frac{W_0 - W_1}{W_0} * 100 \quad (6.6)$$

olarak hesaplanır (Zaniewski ve Pumphrey, 2004).

Burada;

W_0 : İlk numune ağırlığı, (g)

W_1 : Deney sonrası numune ağırlığı, (g)'dir.

Eğer kütle kaybındaki değişim tayin edilecek ise, deney tüpleri etüve yerleştirilmeden önce işaretlenmiş olan iki numune tüpü hem boş iken hem de dolu iken tartılarak ağırlıkları not edilir. Numune tüplerindeki bitüm oda sıcaklığına ulaştıktan sonra, tüpler RTFOT etüvüne yerleştirilir. Hava jetinin önünden her geçişte numune tüplerinin içerisine sıcak hava üflenir. 85 dakikalık şartlandırma sonrasında, kütle kaybında kullanılacak iki tüp de dahil olmak üzere tüpler RTFOT etüvünden çıkartılır. İki tüp oda sıcaklığına ulaştıktan sonra ortalama kütle kaybının tayini için tekrar tartılır.

Kütle kaybı; bitüm içerisindeki uçucu maddelerin kaybindan ibaret olup, bitümün taşıma, depolama, ısıtılma, kaplamanın inşası ve kullanımı esnasında sertleşmesinin bir göstergesidir.

Bitümün kısa dönem yaşlanması neticesindeki toplam kütle değişimi iki olaya bağlıdır. Bitümün bir kısmı buharlaşarak numunede kütle kaybına neden olur. Oksijenin bitüm ile reaksiyona girmesi (oksidasyon) ise numunede kütle artışına neden olur. İki etkinin toplamı neticesinde, numunede kütle artışı veya kütle kaybı olduğu tayin edilir (Hagos, 2008).

6.2.4.2. Basınçlı yaşlandırma kabı (PAV)

Deney BSK'ların hizmet ömrü boyunca oluşacak uzun dönem yaşlanmayı temsil etmek üzere geliştirilmiştir. AASHTO R 28, ASTM D6521 ve EN 14769 standartlarına uygun olarak gerçekleştirilir.

RTFOT deneyinde kısa dönem yaşlanmaya maruz bırakılan bitüm numunesi sonrasında basınç yaşlandırma kabına alınmaktadır. Numuneler 50' şer gram olacak şekilde paslanmaz çelik tavalara alınmakta, cihaza yerleştirildikten sonra 2,1 MPa basınçlı hava ile 20 saat süreyle belirlenen sıcaklıkta şartlandırılarak yaşlanmaya maruz bırakılmaktadır. Şartlandırma sıcaklığı bitümün sınıfına göre seçilmektedir (Loh ve Olek, 1999; Hagos, 2008).

Deneyde kullanılan paslanmaz çelik basınç kabı 90°C-110°C sıcaklık aralığında 2,1 $\pm$ 0,1 MPa basınç altında çalışacak şekilde tasarlanmıştır. Uygulanması gereken deney sıcaklıkları Çizelge 6.14'de verilmiştir.

Çizelge 6.14. Bitüm sınıfına göre PAV deney sıcaklıkları (Zaniewski ve Pumphrey, 2004)

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

20 saat sonunda numune tavaları PAV cihazından çıkarılarak 15 dakika süre ile 163°C'de etüvde beklemeye alınır. Daha sonra numuneler içerisindeki hava kabarcıklarının yok edilebilmesi için 170°C sıcaklık, 15 kPa basınç altında çalışan vakum fırınında 30 dakika süre ile işleme tabi tutulur.

Farklı bitümlerde oluşacak sertleşmenin derecesi PAV kabındaki şartlandırma sıcaklığı ve basınç ile değişkenlik göstermektedir. İki bitüm aynı şartlandırma sıcaklığı ve basınç altında benzer oranda yaşlanırken, başka koşullar altında farklı oranda yaşlanabilmektedir.

Deney sonunda elde edilen bitüm üzerinde DSR, BBR ve DTT deneyleri uygulanabilmektedir.

6.2.5. Performans dereceli (PG) bitüm sınıfı seçimi

Superpave tasarımında performans esaslı bitüm sınıfı iki değişkenli olarak PG X-Y simgesi ile ifade edilmektedir. Burada birinci değişken (X), bitümün en yüksek kaplama tasarım sıcaklığını, ikinci değişken (Y) ise en düşük kaplama tasarım sıcaklığını belirtmektedir. Çizelge 6.15’de kaplama tasarım sıcaklıkları ve bunlara karşılık gelen bitüm sınıfları verilmiştir.

Çizelge 6.15. Kplama tasarım sıcaklıkları ve bitüm sınıfı (McGennis vd., 1995; Lavin, 2003; Zaniowski ve Pumphrey, 2004; Hossain, 2016)

Yüksek Sıcaklık Sınıfları (X)	Düşük Sıcaklık Sınıfları (Y)	Gösterim
(°C)	(°C)	
46	-34, -40, -46	PG 46-Y
52	-10, -16, -22, -28, -34, -40, -46	PG 52-Y
58	-16, -22, -28, -34, -40	PG 58-Y
64	-10, -16, -22, -28, -34, -40	PG 64-Y
70	-10, -16, -22, -28, -34, -40	PG 70-Y
76	-10, -16, -22, -28, -34	PG 76-Y
82	-10, -16, -22, -28, -34	PG 82-Y

6.2.5.1. Meteorolojik veri tabanı

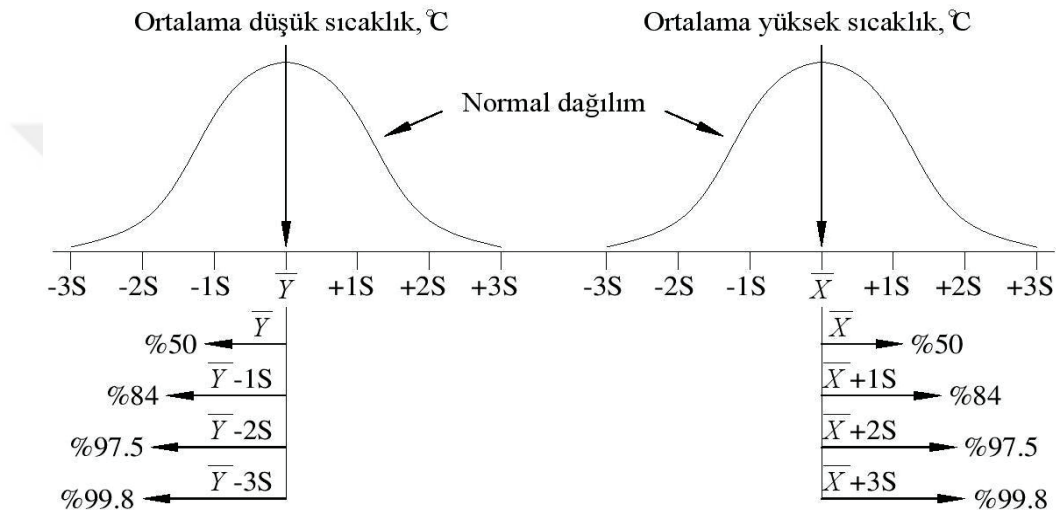
Son 20 yıldaki her yılın ardışık en yüksek 7 günlük ve en düşük bir günlük hava sıcaklık değerleri tespit edilir. Bu değerlerin ortalaması alınarak, yüksek ve düşük hava sıcaklıkları ve bunların standart sapmaları hesaplanır. Bu sıcaklıklar, tasarım koşullarını en iyi temsil eden yöntem olarak tanımlanmıştır. Hesaplamalarda 20 yıldan az veriye sahip istasyonlar dikkate alınmaz (McGennis vd., 1995; Loh ve Olek, 1999; Tam, 2006).

6.2.5.2. Güvenirlik

Güvenirlik, bir yılda gerçek sıcaklığın tasarım sıcaklığını geçmemesi olasılığıdır. Herhangi bir yol projesi için güvenilirliğe karar verilirken, maliyet ve trafik miktarı göz önüne alınmalıdır. PG 64 sınıfı bitüm yüksek sıcaklıklarda %94 güvenilirlik sağlıyor ise, %98 güvenilirlik elde etmek için PG 70 sınıfı bitüm seçilmesi ekonomik olmayabilecektir. Ancak, PG 64 sınıfı bitüm sadece %52 güvenilirlik sağlıyorsa, bu takdirde %98 güvenilirlik

elde etmek için PG 70 sınıfı bitüm seçilmesi doğru olacaktır (WesTrack Forensic Team Consensus Report, 2001).

Düşük ve yüksek sıcaklık değerlerinin güvenilirlik derecelerinin standart sapma ile değişimi Şekil 6.19’da gösterilmiştir. Buna göre; ortalama yüksek sıcaklığa 1 standart sapma ilavesi ile %84; 2 standart sapma ilavesi ile %97,5 (%98 alınmaktadır) ve 3 standart sapma ilavesi ile %99,8 güvenilirlik elde edilmektedir.

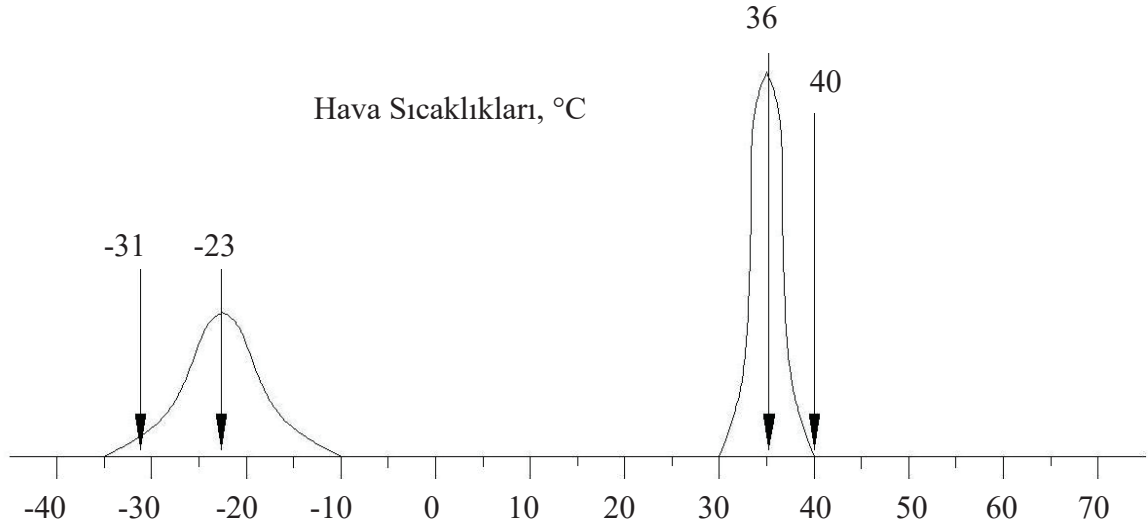


Şekil 6.19. Düşük ve yüksek hava sıcaklığı normal dağılımı ve güvenilirlik kabulleri (McGennis vd., 1995; Harman vd., 2002)

6.2.5.3. Hava sıcaklığı seçimi

Bir bölgenin yüksek ve düşük tasarım hava sıcaklıkları için frekans dağılımları Şekil 6.20’de görülmektedir. Normal bir yaz mevsiminde, ortalama 7 günlük maksimum hava sıcaklığı 36°C ve standart sapma 2°C’dir. Bu dağılıma göre, hava sıcaklığının bir yıl içinde 36°C’ yi aşma ihtimali %50’dir. Ortalama sıcaklığa iki standart sapma ilave edilmesiyle elde edilen 40°C’lik sıcaklığa çok sıcak bir yaz mevsiminde ulaşılma ihtimali %2’dir ve bu durumda güvenilirlik %98 olarak kabul edilir.

Normal bir kış mevsiminde ortalama en düşük sıcaklık -23°C ve standart sapma 4°C olduğunda, çok soğuk bir kış mevsiminde sıcaklığın -31°C olması ihtimali %2 olup, güvenilirlik %98’dir (McGennis vd., 1995; Hicks vd., 2003).



Şekil 6.20. En düşük ve en yüksek hava sıcaklıklarının dağılımı (McGennis vd., 1995)

6.2.5.4. Hava sıcaklıklarının kaplama sıcaklıklarına dönüştürülmesi

Superpave tasarımı, bitüm sınıfının seçilmesinde kullanılacak tasarım sıcaklığı olarak, hava sıcaklığını değil kaplamanın kendi sıcaklığını kullanmaktadır. Ortalama en yüksek 7 günlük hava sıcaklığını esas alarak kaplama yüzeyinden 20 mm derinlikteki en yüksek tasarım sıcaklığını ve en düşük bir günlük ortalama sıcaklığı esas alarak kaplama yüzeyindeki en düşük tasarım sıcaklığını hesaplamaktadır (Huber, 1994; Tam, 2006).

Kaplama tasarım sıcaklık değerlerinin hesaplanmasında, güncel koşullarla ilgili net ısı akışı ve enerji dengesi modeli ile canlandırılan teorik analiz kullanılarak, güneş ışını absorpsiyonu (0,90), hava yoluyla yayılan radyasyon (0,81), atmosferik radyasyon (0,70) ve rüzgar hızı (4,5 m/s) gibi tahmini değerler kullanılmaktadır (Huber, 1994).

Superpave tasarımında, kaplama yüzeyinden 20 mm derinlikteki en yüksek kaplama tasarım sıcaklığı (T_{20mm}), SHRP tarafından geliştirilen aşağıdaki denklem yardımı ile bulunmaktadır: (McGennis vd., 1995; Huber, 1994 ; Loh ve Olek, 1999; Tam, 2006; Garber ve Hoel, 2009)

$$T_{20mm} = (T_{havmaks} - 0,00618 * E^2 + 0,2289 * E + 42,2) * (0,9545) - 17,78 \quad (6.7)$$

Burada;

T_{20mm} : Yüzeyden 20 mm derinlikteki yüksek kaplama tasarım sıcaklığı ($^{\circ}C$)

$T_{havamaks}$: En yüksek 7 günlük ortalama hava sıcaklığı ($^{\circ}C$)

E: Derece olarak projenin uygulanacağı coğrafi bölgenin enlemidir.

Superpave tasarımında en düşük kaplama tasarım sıcaklığı iki yöntemle belirlenebilmektedir. SHRP tarafından kullanılan ve tavsiye edilen birinci yöntem, en düşük hava sıcaklığının en düşük kaplama tasarım sıcaklığı olarak alınmasıdır. İkinci yöntem ise Kanada SHRP tarafından geliştirilen aşağıdaki denklem yardımı ile hesaplanır: (Loh ve Olek, 1999)

$$T_{min} = 0,859 * T_{havamin} + 1,17 \quad (6.8)$$

Burada;

T_{min} : En düşük kaplama tasarım sıcaklığı ($^{\circ}C$)

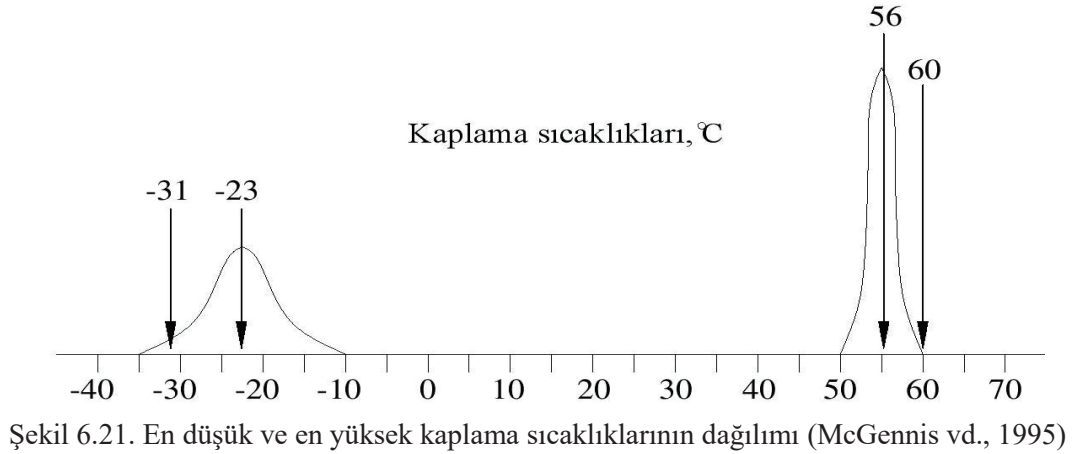
$T_{havamin}$: En düşük bir günlük ortalama hava sıcaklığı ($^{\circ}C$)'dır.

Yukarıdaki denklemler ile bulunan kaplama tasarım sıcaklıkları %50 güvenilirlik derecesinde elde edilmektedir. Elde edilen bu değerlere her bir sıcaklık türünün standart sapması, aşağıdaki denklemlerde olduğu gibi ilave edildiğinde, Superpave sisteminde esas alınan %98 güvenilirlik değerleri elde edilir:

$$T_{20mm\%98} = T_{20mm\%50} + 2S_{maks} \quad (6.9)$$

$$T_{min\%98} = T_{min\%50} + 2S_{min} \quad (6.10)$$

Yukarıda düşük ve yüksek hava sıcaklıkları ve standart sapmaları verilen ve enlem derecesi ($40,63^{\circ}C$) olan bir bölgeye ait kaplama tasarım sıcaklıkları, ilgili denklemler kullanılarak %50 ve %98 güvenilirlikte grafik olarak Şekil 6.21'de verilmiştir.



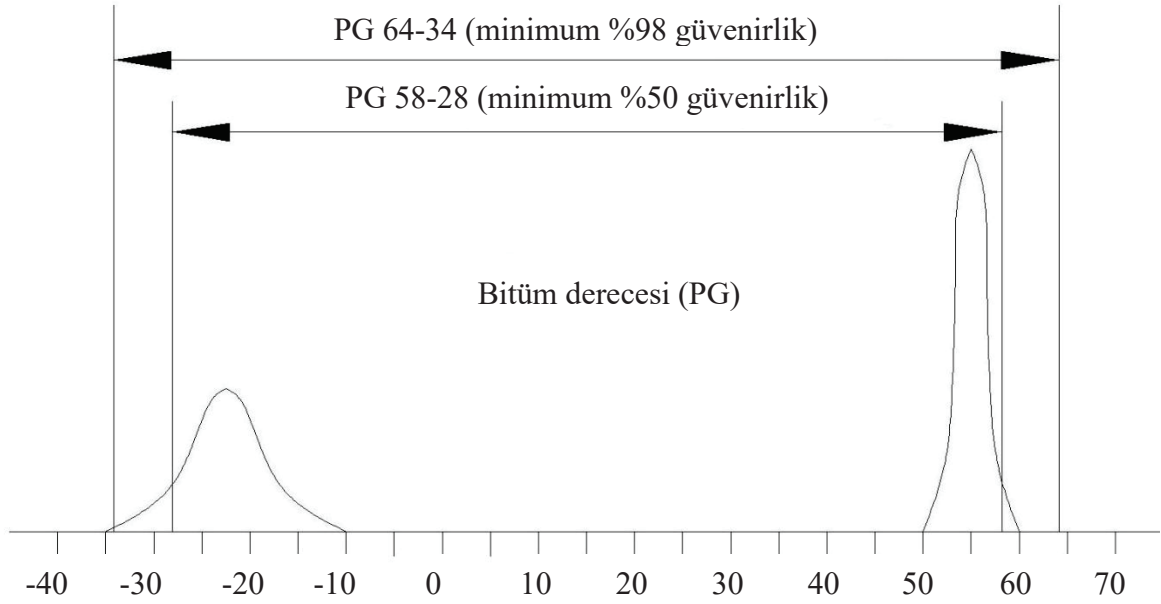
6.2.5.5. Kaplama sıcaklıklarına göre bitüm seçimi

Yukarıda hava sıcaklıkları verilen bölgenin en az %50 güvenilirlik için yüksek sıcaklık sınıfı PG 58 olmalıdır. Söz konusu bölge için %50 güvenilirlikle bulunmuş kaplama tasarım sıcaklık değerleri; yüksek sıcaklık için 56°C, düşük sıcaklık için -23°C olarak bulunmuştur. (Şekil 6.21) 56°C’de bitüm sınıfı mevcut olmadığından bir üst sınıfın seçilmesi gerekmekte ve %50 güvenilirlik için yüksek sıcaklık derecesi PG 58-Y olmaktadır. Daha düşük bir derece olan 52°C seçilirse, güvenilirlik %50’den az olacaktır. Benzer şekilde, -23°C’den daha düşük sıcaklıklar dikkate alınarak düşük sıcaklık derecesi PG X-28 olmalıdır. Kaplama tasarım sıcaklıklarında %98 güvenilirlik esas alındığından, yüksek sıcaklık derecesi PG 64-Y, düşük sıcaklık derecesi ise PG X-34 olmalıdır. Her iki değer farklı güvenilirlik dereceleri için Superpave sistemine göre birleştirildiğinde, Şekil 6.22’de belirtilen bitüm sınıfı belirlenmiş olur (McGennis vd., 1995; FHWA, 1997).

6.2.5.6. Trafik hızına ve sayısına göre seçim

Superpave bitüm seçiminde, yolun normal trafik koşulları esas alınır. Kaplama üzerindeki trafiğin hızlı olduğu ve yükün kısa süreli uygulandığı kabul edilir. Yüksek sıcaklık tasarımında kalıcı deformasyonlarla yakından ilgili olan yükleme hızı performansına etki eden ilave bir faktördür. Şartname, yavaş hareket eden ve duran taşıtlar için yüksek sıcaklık tasarımında ilave önlemleri gerekli görmektedir. Düşük yükleme oranlarını karşılayabilmesi için bitümün daha sert bir özelliğe sahip olması gerekir. Bunun için, yükleme oranı veya trafik hızına göre yüksek sıcaklık derecesinin en az bir veya iki derece artırılması gereklidir. Normal koşullarda PG 64-XX olan bitüm sınıfı, yavaş hareket eden

yükler nedeniyle bir derece artırılarak PG 70-XX, duran yükler için de bir derece artırılarak PG 76-XX olarak seçilecektir. Yükleme durumu düşük sıcaklık derecesi seçilmesinde etkili değildir (Tam, 2006; WesTrack Forensic Team Consensus Report, 2001).



Şekil 6.22. Superpave bitüm seçimi (McGennis vd., 1995)

Ayrıca kaplamanın maruz kalacağı yüksek sayıdaki eşdeğer tek dingil yükleri için de ilave önlemler alınır. Eşdeğer tek dingil yükü (ETDY), iki dingilli ve dört tekerlekli bir araçta 80 kN (8 t) olarak tanımlanır. Üstyapı tabaka kalınlıklarının hesaplanmasında birim yük olarak kabul edilmektedir. Normal koşullarda hareket eden ve trafik yükü 10 milyon ile 30 milyon eşdeğer dingil yükü arasında tahmin edilen bir yolda mühendis, iklime göre tespit edilen bitüm sınıfının yerine bir üst sınıfı tercih edebilir. Ancak, eşdeğer dingil yükü 30 milyondan fazla olduğu takdirde bir yüksek performans dereceli bitüm seçilmesi gerekir (FHWA, 1997).

Çizelge 6.16'da trafik sayısı ve hızına bağlı olarak bitüm sınıfı seçilmesinde AASHTO MP-2 standardı tarafından önerilen düzeltme katsayıları verilmiştir.

Çizelge 6.16. Trafik hızı ve sayısı esas alınarak bitüm seçilmesi (C-SHRP, 1999; Harman vd., 2002; Hossain, 2016)

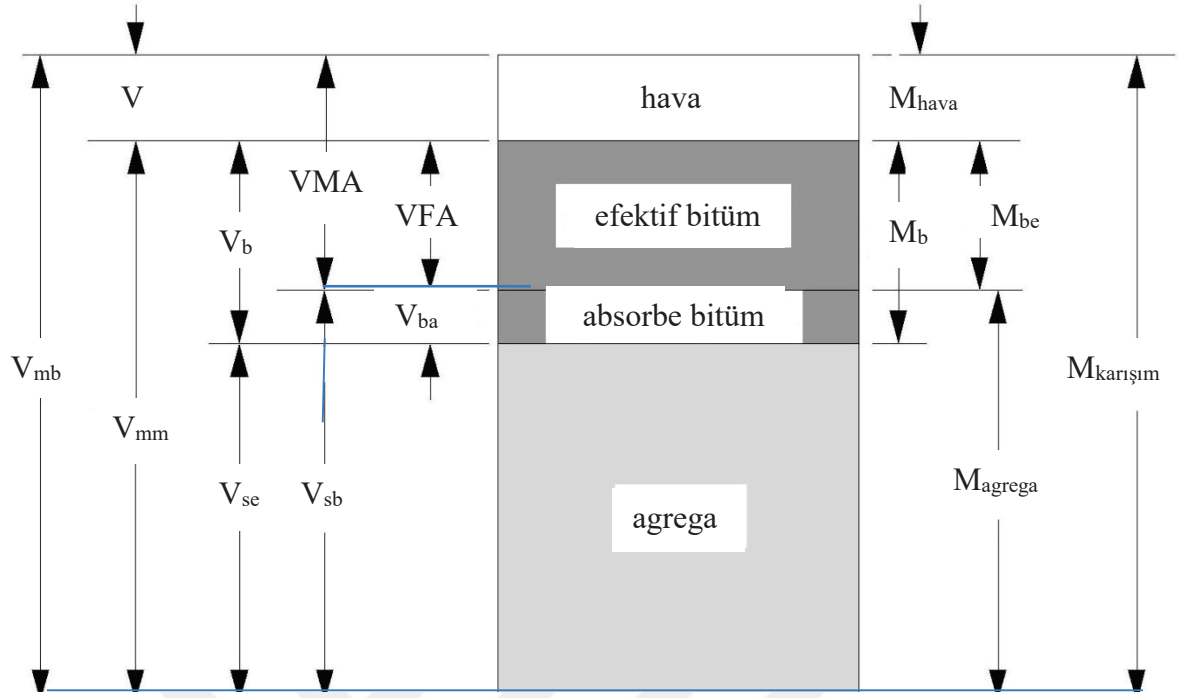
Tasarım ETDY Sayısı, milyon (20 yıllık)	Bitüm PG derecesi düzeltmesi		
	Trafik hızı (Yük oranı)		
	Duran trafik (<20 km/h)	Yavaş trafik (20- 70 km/h)	Standart trafik (>70 km/h)
< 0,3	---	---	---
0,3 – 3,0	2	1	---
3,0 -10,0	2	1	---
10,0 – 30,0	2	1	---
≥ 30,0	2	1	1

6.2.6. Karışımların hacimsel özellikleri

Asfalt beton karışımların davranışı dikkate alındığında hesaba katılması gereken unsur, bitüm ve agrega bileşenlerinin hacimsel oranlarıdır. Superpave tasarımı geliştiren araştırmacılar, bitümlü karışımların hacimsel özelliklerinin çok önemli olduğunu değerlendirmişler ve bu nedenle hacimsel karışım tasarım protokolünü geliştirmişlerdir.

Sıkıştırılmış bir kaplama karışımının hacimsel özellikleri olan hava boşlukları (V), agregalar arasındaki boşluklar (VMA), bitümle dolu boşluklar (VFA) ve efektif bitüm içeriği (P_{be}), kaplamanın hizmet performansının göstergesi olarak dikkate alınmaktadır (Geçkil, 2008; Druta, 2006).

BSK'ların kütle ve hacim özelliklerini tanımlamak için kullanılan model, bileşen diyagramı olup Şekil 6.23'de gösterilmiştir. Bileşen diyagramı, sıkışmış bir BSK numunesindeki hava boşlukları, bitüm ve agrega bileşenlerini ayrı bileşenler gibi göstererek oluşturulan modeldir.



Şekil 6.23. Sıkışmış BSK numunesinin bileşen diyagramı (Druta, 2006; Tam, 2006; Advanced Asphalt Technologies, 2011; Hunter vd., 2015; Nikolaides, A., 2015; Hossain, 2016; FHWA,1997)

- VMA : Agregalar arası boşluk hacmi
- V_{mb} : Sıkışmış asfalt beton karışımının hacmi
- V_{mm} : Asfalt beton karışımının boşluksuz hacmi
- VFA : Bitüm ile dolu boşluk hacmi
- V : Hava boşluk hacmi
- V_b : Bitüm hacmi
- V_{ba} : Absorbe bitüm hacmi
- V_{sb} : Mineral agreganın hacmi (hacim özgül ağırlığı)
- V_{se} : Mineral agreganın hacmi (efektif özgül ağırlığı)
- M_b : Bitüm kütlesi
- M_{be} : Efektif bitüm kütlesi
- M_{agrega} : Agreganın kütlesi
- M_{hava} : Havanın kütlesi
- $M_{karışım}$: Asfalt beton karışımının toplam kütlesi

Superpave karışım tasarımı, agreganın hacim özgül ağırlığı (G_{sb}) cinsinden sıkıştırılmış asfalt beton karışımlarının agregalar arası boşluk hacmi (VMA) değerini hesaplar. Agreganın efektif özgül ağırlığı (G_{se}), sıkıştırılmış bir asfalt beton karışımının hava

boşluklarının hesaplanmasında esas teşkil eder. VMA ve V, BSK hacminin yüzdeleri olarak ifade edilirler. Bitümle dolu boşluklar (VFA), efektif bitüm ile agregalar arası boşlukların (VMA) yüzdesidir. Karışımdaki efektif bitüm içeriği BSK toplam ağırlığı veya karışımdaki agregaların ağırlığının yüzdesi olarak ifade edilmektedir (Geçkil, 2008).

6.2.6.1. Sıkıştırılmış karışımdaki agregalar arası boşluk (VMA) hacmi

VMA, hava boşlukları ve efektif bitüm miktarının kapladığı hacim de dahil olmak üzere, sıkıştırılmış BSK'daki agregalar arasındaki boşluk hacmi oranıdır. VMA; agreganın hacim özgül ağırlığına göre hesaplanır ve sıkıştırılmış asfalt beton karışımının hacim özgül ağırlığının yüzdesi olarak ifade edilir. Bu sebeple VMA, sıkıştırılmış asfalt beton karışımının toplam hacminden, hacim özgül ağırlığınca belirlenmiş agregalar hacminin çıkarılması ile hesaplanır. VMA oranı, karışım ağırlığı ve agregalar ağırlığının yüzdesi olarak aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır (Cominsky, 1994; Hunter vd., 2015; Lavin, 2003; Garber ve Hoel, 2009).

Eğer karışım bileşimi toplam karışım ağırlığının yüzdesi olarak tespit edilmişse;

$$VMA = 100 - \frac{G_{mb} - P_s}{G_{sb}} \quad (6.11)$$

VMA : Karışımın toplam hacminin yüzdesi olarak agregalar arası boşluklar, (%)

G_{sb} : Agregalar karışımının hacim özgül ağırlığı, (g/cm³)

G_{mb} : Sıkıştırılmış karışımın hacim özgül ağırlığı, (g/cm³)

P_s : Toplam karışımın ağırlıkça yüzdesi olarak agregalar içeriği, (%)

Eğer karışım bileşimi toplam agrega ağırlığının yüzdesi olarak tespit edilmişse;

$$VMA = 100 - \frac{G_{mb}}{G_{sb}} * \frac{100}{100 + P_b} * 100 \quad (6.12)$$

P_b : Toplam agreganın ağırlıkça yüzdesi olarak bitüm içeriği, (%)

Superpave tasarımında, agrega boyutuna bağlı olarak % 4 tasarım hava boşluğunda önerilen minimum VMA değerleri Çizelge 6.17’de verilmiştir.

Çizelge 6.17. Superpave VMA sınır şartları, (Cominsky, 1994; FHWA, 1997; Hossain, 2016)

Nominal maksimum agrega boyutu (mm)	Minimum VMA (%)
9,5	15,0
12,5	14,0
19	13,0
25	12,0
37,5	11,0

6.2.6.2. Sıkıştırılmış karışımdaki hava boşlukları (V) yüzdesi

Sıkıştırılmış asfalt beton karışımdaki toplam hava boşlukları (V), bitüm ile kaplanmış agrega taneleri arasında oluşan boşluklardır. Sıkıştırılmış karışımdaki hava boşluğu oranı aşağıdaki denklem ile belirlenir ve bütün trafik düzeyleri için tavsiye edilen V değeri % 4’tür (Geçkil, 2008).

$$V = \frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}} * 100 \quad (6.13) \quad (\text{Cominsky, 1994})$$

V : Sıkıştırılmış bir karışımda toplam hacmin yüzdesi olarak hava boşlukları,
 G_{mm} : Karışımın maksimum özgül ağırlığı (hesaplanmış veya deneyle bulunmuş),
 G_{mb} : Sıkıştırılmış karışımın hacim özgül ağırlığı, (g/cm³)

Hava boşluğu; asfalt beton tasarımında önemli bir kriter olup, asfalt betonun hizmet ömrü üzerinde oldukça etkilidir. Hava boşluğu yüksek ise, karışımın hava ve su geçirimsizliği fazla olur. Nem hasarı veya yaşlanma fazlalaşır. Hava boşluğu düşük

olduğunda, bitüm oranı yüksek olur. Kuma ve plastik deformasyon artar (Hunter vd., 2015).

Tasarlanan karışım tipine ve kullanılan tasarım yöntemine bağlı olmakla beraber; laboratuvar ortamında BSK'lar yaklaşık %3-5 boşluk oranı aralığında tasarlanır. İnşaat sahasında serilen asfalt betonu sıkıştırma sonrasında %6-8 oranında hava boşluğuna sahip olmaktadır. Ancak, yolun hizmete verilmesinden sonra kaplama üzerinde başlayan trafik akışının etkisiyle, zamanla hava boşluğu miktarı tasarım değeri olan %3-5 aralığına yaklaşmaktadır (Speight, 2016).

İnşaat esnasında yeterli sıkıştırma yapılmadığı takdirde, trafik yüklerinin etkisiyle belirli bir düzeyde sıkışma olsa da, tasarım aralığı olan %3-5 hava boşluğu oranını yakalamak mümkün olmayacaktır. Sonuçta, asfalt betonu hava ve su açısından geçirimli olacak, nem hasarı ve aşırı oksidasyon sertleşmesiyle birlikte kaplamanın hizmet ömrü azalacaktır (Speight, 2016).

6.2.6.3. Sıkıştırılmış karışımındaki bitümle dolu boşluk (VFA) oranı

Karışımındaki bitümle dolu boşluk oranı (VFA), agrega tarafından absorbe edilmiş bitüm hariç aşağıdaki denklem ile belirlenir: (Papagiannakis ve Masad, 2008; Nikolaides, A., 2015)

$$VFA = \frac{VMA - V}{VMA} * 100 \quad (6.14)$$

Burada;

VFA : VMA'nın yüzdesi olarak bitüm ile dolu boşluklar, (%)

V : Karışımında toplam hacmin yüzdesi olarak hava boşluğu oranı, (%)

Superpave tasarımında, trafik düzeyine bağlı olarak %4 tasarım hava boşluğu yüzdesinde kabul edilebilir VFA değer aralığı Çizelge 6.18'de verilmiştir.

Çizelge 6.18. Superpave VFA sınır değerleri (Cominsky, 1994; McGennis vd., 1995 FHWA, 1997)

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

Asfalt betonların tasarımında, VFA; agregalar arası boşluklar ve efektif bitüm içeriği (P_{be}) ile yakından ilintilidir. Çünkü belirlenen hava boşluğu %4 gibi sabit bir değer olduğundan, VMA arttıkça hem P_{be} hem de VFA artmaktadır (Hunter vd, 2015).

6.2.6.4. Bitüm oranı (P_b)

Asfalt betonun bitüm oranı en önemli özelliklerinden biridir. Bitüm oranının gerekenden az olması; yerleştirilmesi ve sıkıştırılması zor, yorulma çatlakları ile durabilite problemlerine açık, sert ve kuru karışımlara neden olur (Advanced Asphalt Technologies, 2011). Yüksek oranlı bitüm kullanımı ile asfalt betonu ekonomik olmayacak, kuma ve deformasyona maruz kalacaktır (Hunter vd, 2015).

6.2.6.5. Bitüm absorpsiyonu (P_{ba})

Agrega daneleri tarafından absorbe edilen bitüm, asfalt betonun performans karakteristiklerini etkilemez ancak agreganın özgül ağırlığına bağlı olarak değişkenlik gösterir. Bitüm absorpsiyonu agreganın ağırlığının yüzde oranı olarak ifade edilir ve aşağıda verilen denklem kullanılarak hesaplanır (Hunter vd, 2015):

$$P_{ba} = \frac{100 * (G_{se} - G_{sb}) * G_b}{G_{se} * G_{sb}} \quad (6.15) \quad (\text{Nikolaides, A., 2015})$$

Burada;

P_{ba} : Toplam agreganın ağırlığının yüzde oranı olarak bitüm absorpsiyonu, (%)

G_{se} : Agreganın efektif özgül ağırlığı, (g/cm³)

G_{sb} : Agreganın hacim özgül ağırlığı, (g/cm³)

G_b : Bitüm özgül ağırlığı, (g/cm³)

6.2.6.6. Efektif bitüm içeriği (P_{be})

Efektif bitüm içeriği, bir karışımdaki agregaya tarafından absorbe edilen bitüm miktarı hariç olmak üzere, geriye kalan bitüm miktarını ifade eder. Aşağıdaki denklem yardımıyla hesaplanır: (Hicks vd., 2003)

$$P_{be} = P_b - \frac{P_{ba} * P_s}{100} \quad (6.16) \quad (\text{Nikolaides, A., 2015})$$

Burada;

P_{be} : Karışımın toplam ağırlığının yüzde kısmı olarak efektif bitüm oranı, (%)

P_b : Karışımın toplam ağırlığının yüzde kısmı olarak bitüm oranı, (%)

P_{ba} : Toplam agregaya ağırlığının yüzde oranı olarak bitüm absorpsiyonu, (%)

P_s : Karışımın toplam ağırlığının yüzde kısmı olarak agregaya miktarıdır.

6.2.6.7. Agrega hacim özgül ağırlığı (G_{sb})

Agrega karışımı, herbiri değişik özgül ağırlıklara sahip kaba agregaya, ince agregaya ve mineral fillerden oluştuğundan toplam agreganın hacim özgül ağırlığı aşağıdaki denklem ile hesaplanır: (Garber ve Hoel, 2009; Nikolaides, A., 2015)

$$G_{sb} = \frac{P_1 + P_2 + \dots + P_n}{\frac{P_1}{G_1} + \frac{P_2}{G_2} + \dots + \frac{P_n}{G_n}} \quad (6.17) \quad (\text{Cominsky, 1994; Asphalt Institute, 2007})$$

Burada;

$P_1, P_2, \dots, P_n$: Agregaların ağırlıkça oranları, (%)

$G_1, G_2, \dots, G_n$: Agregaların hacim özgül ağırlıkları, (g/cm³)

6.2.6.8. Agrega efektif özgül ağırlığı (G_{se})

Agreganın efektif özgül ağırlığı, karışımın maksimum özgül ağırlığından yararlanılarak aşağıdaki denklem ile hesaplanmaktadır. Agregaya ağırlığının, agregaya efektif

hacmine bölünmesi ile elde edilir. Bu efektif hacim; agreganın hacmi ile bitüm ile dolu olmayan dış boşlukların toplamına eşittir (Papagiannakis ve Masad, 2008).

$$G_{se} = \frac{100 - P_b}{\frac{100}{G_{mm}} - \frac{P_b}{G_b}} \quad (6.18)$$

Burada;

G_{mm} : Karışımın teorik maksimum özgül ağırlığı, (g/cm³)

P_b : Karışımın toplam ağırlığının yüzde kısmı olarak bitüm oranı, (%)

G_b : Bitüm özgül ağırlığı, (g/cm³)

6.2.6.9. Gevşek karışımın maksimum özgül ağırlığı (G_{mm})

Asfalt beton karışımın teorik maksimum özgül ağırlığı, sıfır hava boşluğu oranındaki özgül ağırlığıdır. Deney tasarımı ASTM D2041 ve AASHTO T 209 standartlarında belirtilmiştir. Hacim özgül ağırlığı gibi, teorik maksimum özgül ağırlık da asfalt betonun performansını etkilemez. Ancak, hava boşluğu oranı ve VMA gibi performans kriterleri olan hacimsel özelliklerin tayini için önemlidir (Papagiannakis ve Masad, 2008; Hunter vd, 2015).

Maksimum özgül ağırlık, gevşek haldeki karışımın içerisindeki havanın vakum yardımı ile alınması ile tayin edilir. Gevşek haldeki asfalt beton numunenin özgül ağırlığı aşağıdaki formüle göre hesaplanabilir:

$$G_{mm} = \frac{A}{A + D - E} \quad (6.19) \text{ (Hunter vd, 2015)}$$

Burada;

G_{mm} : Karışımın teorik maksimum özgül ağırlığı (g/cm³),

A : Kuru numunenin havadaki ağırlığı (g),

D : Deney tüpünün 25°C'deki su ile dolu haldeki ağırlığı (g),

E : Deney tüpünün numune ile beraber 25°C'deki su ile dolu haldeki ağırlığı (g)'dir.

G_{mm} ayrıca aşağıdaki denklem kullanılarak da hesaplanabilir: (Asphalt Institute, 2007; Garber ve Hoel, 2009)

$$G_{mm} = \frac{100}{\frac{P_s}{G_{se}} + \frac{P_b}{G_b}} \quad (6.20)$$

Burada;

G_{se} : Agrega efektif özgül ağırlığı, (g/cm³)

P_b : Karışımın toplam ağırlığının yüzde kısmı olarak bitüm oranı, (%)

P_s : Karışımın toplam ağırlığının yüzde kısmı olarak agreganın miktarı, (%)

G_b : Bitüm özgül ağırlığı, (g/cm³)

6.2.6.10. Sıkıştırılmış karışım hacim özgül ağırlığı (G_{mb})

Sıkıştırılmış asfalt beton karışımının hacim özgül ağırlığı (G_{mb}), ASTM D1189 ve D2726 ile AASHTO T 269 standartlarında belirtilen tasarıma uygun olarak belirlenir. Aşağıdaki denklem yardımıyla hesaplanır:

$$G_{mb} = \frac{M_k}{M_{ssd} - M_s} \quad (6.21) \quad (\text{Papagiannakis ve Masad, 2008})$$

Burada;

M_k : Numunenin havadaki kuru ağırlığı, (g)

M_{ssd} : Numunenin doymuş yüzey kuru ağırlığı, (g)

M_s : Numunenin sudaki ağırlığı, (g)

6.2.7. Superpave karışım tasarımı

Superpave karışım tasarımı, kendi şartnamesini sağlayan uygun agreganın ve bitüm malzemesinin seçilmesini içermektedir. Karışım tasarım işlemleri, Superpave agreganın gradasyon kriterlerini sağlayan farklı agreganın deneme karışımlarını hazırlayarak, bu deneme karışımlarını bitüm ile karıştırmak ve bu sıcak karışımları kısa dönem yaşlandırmaya tabi

tutmak, yaşlanmış numuneleri sıkıştırmak ve agrega deneme karışımlarının hacimsel özelliklerini analiz ederek en iyi agrega deneme karışımını tasarım agrega gradasyonu olarak seçmek, müteakiben seçilen tasarım agrega gradasyonu için gerekli olan tasarım bitüm içeriğini belirlemek amacıyla çeşitli bitüm içeriklerinde karışım numunesi hazırlamaktır (Geçkil, 2008).

Superpave karışım numunesi hazırlama esasları, AASHTO TP4 “SHRP Yoğurtmalı sıkıştırıcı ile sıkıştırılmış modifiye ve modifiye olmayan BSK numunelerinin hazırlanması” ve AASHTO PP2 “Bitümlü karışımların kısa ve uzun dönem yaşlandırılması” standartları ile belirtilmiştir (Geçkil, 2008).

Superpave karışım tasarımında deney ve analiz sürecinde dört ana basamak vardır: (FHWA,1997; Harman vd., 2002; Hicks vd., 2003)

- Malzemelerin seçilmesi (agrega, bitüm, modifiye edici katkı, vb.),
- Tasarım agrega yapısının seçilmesi,
- Tasarım bitüm içeriğinin seçilmesi,
- Tasarlanan karışımın nem hassasiyetinin değerlendirilmesi.

Malzeme seçimi, yol projesi için trafik ve çevresel faktörlerin belirlenmesini kapsar. Tasarım agrega yapısının seçilmesi ise bir deneme sürecidir. Bu amaçla üç agrega deneme karışımı hazırlanarak Superpave şartlarını sağlayan karışım tasarım agrega dane dağılımı olarak seçilir (FHWA,1997).

Tasarım bitüm içeriğinin seçilmesi, tasarım agrega yapısı ile kabul edilebilir hacimsel ve sıkıştırma özelliklerine sahip asfalt beton karışımların elde edilebilmesi için bitüm miktarının belirlenmesini içerir (FHWA,1997).

Nem hassasiyetinin değerlendirilmesi; tasarlanan karışım için AASHTO T 283’e göre gerekli deneyin yapılarak, karışımın nem hasarına yatkın olup olmadığının tespitini içerir (FHWA,1997).

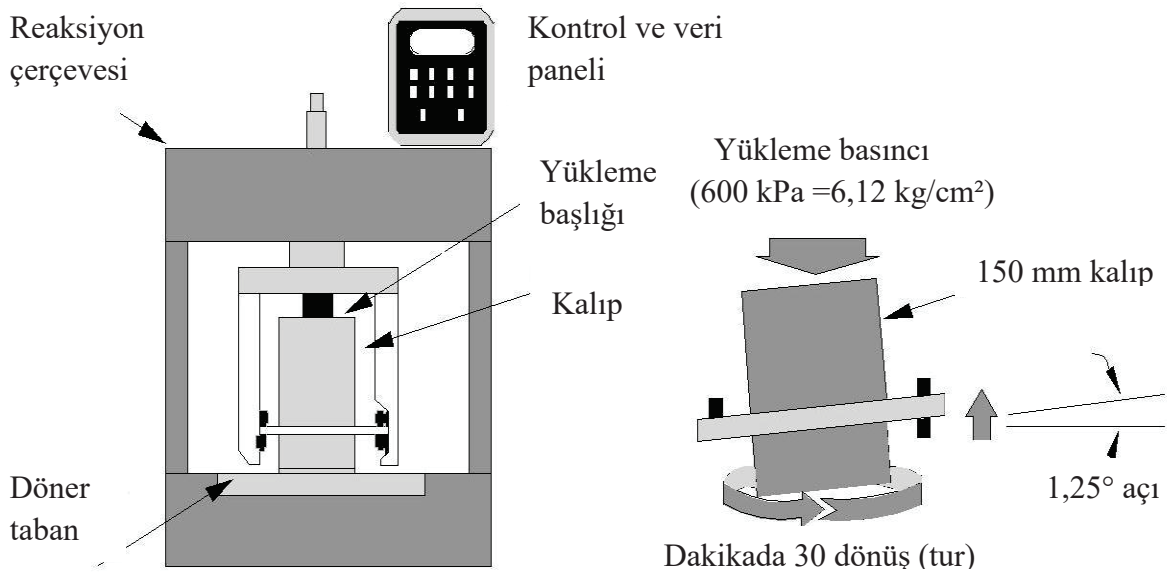
6.2.7.1. Superpave yoğurmalı sıkıştırıcısı (Gyratory Compactor)

Superpave tasarım metodu, numunelerin sıkıştırılması için Superpave yoğurmalı sıkıştırma cihazını (SGC) kullanır. SGC'nin temelini Texas yoğurmalı kompaktörü oluşturur.

Superpave yoğurmalı sıkıştırıcısı aşağıdaki bileşenlerden oluşur: (Asphalt Institute, 2007)

- Reaksiyon çerçevesi, dönel tabla ve motor,
- Yükleme sistemi, yükleme başlığı ve basınç ölçer,
- Yükseklik ölçüm ve kayıt sistemi,
- Kalıp ve tabla,
- Numune kalıptan çıkarma cihazı

Yükleme başlığı vasıtasıyla numune üzerine 600 kPa (6,12 kgf/cm²)'lık bir yük uygulanırken, 150 mm çapındaki numune kalıbı altındaki dönel tabla 1,25°'lik açı ile dakikada 30 dönüş yapmaktadır. Yoğurmalı sıkıştırıcı ve kalıp modeli Şekil 6.24'de gösterilmiştir(Asphalt Institute, 2007; Tunç, 2007).



Şekil 6.24. (a) Superpave yoğurmalı sıkıştırıcısı (b) Kalıp modeli (Druta, 2006; Asphalt Institute, 2007; Hunter vd., 2015; Hossain, 2016)

Superpave yoğurmalı sıkıştırıcısı deney sırasında numune yüksekliğini ölçer. Kalıp içerisine yerleştirilen malzemenin ağırlığı, kalıbın çapı ve numune yüksekliğinden hareketle, sıkıştırma işlemi esnasında herhangi bir an için numune yoğunluğu belirlenebilir. Numune yoğunluğu, numunenin kütlesinin hacmine bölünmesiyle hesaplanır. Yükseklik ise deney esnasında yükleme başlığının konumuna göre ölçülür (Asphalt Institute, 2007).

Yoğurmalı sıkıştırıcı düşey basınç, yoğurma açısı ve sahadaki sıkıştırmayı müteakip oluşacak trafiği temsil eden yoğurma sayısının değiştirilebilmesine olanak verir. Düşey basınç olarak genellikle kamyon lastik basıncına yaklaşık olarak eşit olan 120 psi (828 kPa) değeri seçilir. Yoğurma açısı ve dönüş sayısı ile ilgili genellikle 1,25° yoğurma açısı ve 300 dönüş tercih edilir.

Yoğurmalı sıkıştırıcı ile numune sıkıştırılırken, karışımın birkaç özelliği tayin edilebilir. Yoğurma (Gyratory) kesme indeksi (GSI) karışımın stabilitesi ve kalıcı deformasyonların bir ölçüsüdür. Stabil olmayan karışımlarda, asfalt beton karışımının plastik akması nedeniyle sıkıştırma esnasında ölçülen yoğurma açısı artar. Stabil karışımlarda yoğurma açısı önemli oranda artmaz. 1,0'e yakın GSI değerleri stabil karışımlar için tipik bir durum olup, 1,1'in üzerindeki değerler stabil olmayan karışımların göstergesidir.

Yoğurmalı sıkıştırıcı sıkıştırma esnasında karışımın kesme direncini ölçme kabiliyetine sahiptir. Yüksek sıcaklıktaki sıkıştırma esnasında ölçülen kesme direnci aslında agrega özelliklerinin bir ölçüsüdür (Brown vd., 2001).

Superpave yoğurmalı sıkıştırıcı kullanılarak 100 mm ve 150 mm çapında numuneleri hazırlamak mümkündür. Jackson ve Czor (2003) tarafından yapılan çalışmada; Superpave yoğurmalı sıkıştırıcı kullanılarak 100 mm'lik numuneler hazırlanmış ve 150 mm'lik numunelerle karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, mühendislik bakımından iki numunenin sonuçları arasında önemli bir fark olmadığı ve maksimum dane boyutu 25,4 mm veya daha küçük boyutlu agrega karışımlarının hazırlanmasında 100 mm'lik kalıpların kullanılabileceği belirtilmiştir.

Mevcut karışım tasarım yöntemlerinde olduğu gibi, Superpave sisteminde de numuneler belirli bir sıkıştırma enerjisiyle sıkıştırılmaktadır. Superpave sisteminde bu sıkıştırma enerjisi, yoğurma sayısının (N_{des}) bir fonksiyonu olarak alınmaktadır. Sıkıştırıcının dönüş veya yoğurma sayısına bağlı olarak sıkıştırma enerjisinin seviyesi Çizelge 6.19’da verilmiştir. Dönüş sayısı veya sıkıştırma enerjisi seviyesi, tasarım trafik yüküne ve ortalama tasarım yüksek hava sıcaklığına bağlı olarak N_{des} değeri olarak alınmaktadır. Ortalama tasarım yüksek sıcaklığı olarak, kaplamanın yapılacağı bölgenin iklimini temsil eden ortalama 7 günlük en yüksek hava sıcaklığı (%50 güvenirlilikteki sıcaklık) esas alınır ve Superpave yazılımı tarafından belirlenir. Trafik ise tasarım eşdeğer trafik yükleme sayısı ile temsil edilir (Tunç, 2007).

Çizelge 6.19. Superpave yoğurmalı sıkıştırma enerjisi (Cominsky, 1994; FHWA, 1997; Tunç, 2007)

Tasarım Trafik (ETDY),milyon	Ortalama Tasarım Yüksek Hava Sıcaklığı											
	< 39			39-40			41-42			43-44		
	N_{ini}	N_{des}	N_{maks}	N_{ini}	N_{des}	N_{maks}	N_{ini}	N_{des}	N_{maks}	N_{ini}	N_{des}	N_{maks}
< 0,3	7	68	104	7	74	114	7	78	121	7	82	127
0,3-1	7	76	117	7	83	129	7	83	129	8	93	146
1-3	7	86	134	8	95	150	8	95	150	8	105	167
3-10	8	96	152	8	106	169	8	106	169	9	119	192
10-30	8	109	174	9	121	195	9	121	195	9	135	220
30-100	9	126	204	9	139	228	9	139	228	10	153	253
>100	9	143	235	10	158	262	10	158	262	10	172	288

Superpave yoğurmalı sıkıştırıcı ile sıkıştırılmış karışımların analizi, üç sıkıştırma düzeyindeki (N_{ini} , N_{des} , N_{maks}) teorik maksimum özgül ağırlığının (G_{mm}) yüzdesi esas alınarak yapılmaktadır. Bu sıkıştırma düzeyleri aşağıdaki gibi ifade edilmektedir:

N_{ini} ; başlangıç yoğurma sayısıdır ve yapım sırasında karışımın sıkışabilirliğini ölçmek için kullanılmaktadır. Bu aşamada çok çabuk sıkışan karışımlar (N_{ini} ’de hava boşluğu çok düşük), inşaat esnasında hassas olabilir ve trafik yükleri altında stabil olmayabilir. Bu sebeple karışım, başlangıç yoğurma sayısında en az % 11 hava boşluğu yüzdesine sahip olmalıdır (Geçkil, 2008; Speight, 2016).

N_{des} ; tasarım yoğurma sayısıdır ve belirlenen trafik yüklerinin etkisiyle kaplamada oluşması beklenen yoğunlukta numunelerin üretilebilmesi için gerekli olan yoğurma sayısıdır. Karışım tasarımında, bu yoğurma sayısı için arzu edilen hava boşluğu yüzdesi % 4'tür (Geçkil, 2008; Speight, 2016).

N_{maks} ; maksimum yoğurma sayısıdır ve sahada kesinlikle aşılmaması gereken laboratuvar yoğunluğunun elde edilebilmesi için gerekli olan yoğurma sayısıdır. Bu yoğurma sayısındaki hava boşluğu yüzdesi çok düşük ise, BSK trafik yüklerinin etkisi altında çok fazla sıkışabilir ve bu durum tekerlek izi oluşumu ile sonuçlanabilir. Bu nedenle maksimum yoğurma sayısındaki hava boşluğu yüzdesi %2'den az olmamalıdır (Geçkil, 2008; Speight, 2016).

Başlangıç ve maksimum yoğurma sayıları ile tasarım yoğurma sayısı arasında aşağıdaki ilişkiler mevcuttur (Garber ve Hoel, 2009).

$$\text{Log } N_{maks} = 1,10 * \text{Log } N_{des} \quad (6.22)$$

$$\text{Log } N_{ini} = 0,45 * \text{Log } N_{des} \quad (6.23) \text{ (FHWA,1997; Tunç, 2007)}$$

Yukarıda verilen sıkıştırma düzeylerine bağlı olarak Superpave yoğunluk gereksinimleri Çizelge 6.20'de verilmiştir.

Çizelge 6.20. Superpave sıkıştırma kriterleri (Cominsky, 1994; Harman vd., 2002; Lavin, 2003; Asphalt Institute, 2007; Nikolaides, A., 2015)

Tasarım Trafik (ETDY), milyon	Gerekli Yoğunluk (% G _{mm})		
	N _{ini}	N _{des}	N _{maks}
< 0,3	≤ 91,5	96,0	≤ 98,0
0,3-3	≤ 90,5		
3-10	≤ 89,0		
10-30			
>30			

6.2.7.2. Tasarım agrega gradasyonu seçimi

Tasarım agrega gradasyonu seçilmeden önce kullanılacak agrega ve bitüm malzemelerinin seçilmiş veya onaylanmış olması gerekir. Tasarım agrega gradasyonun

seçmek için kullanılacak maksimum boyuttaki agrega boyutuna göre bir gradasyon dizisini kapsayan üç deneme karışımı başlangıç olarak yeterli görülmektedir (McGennis vd., 1995).

Bu deneme karışımları, belirli elek aralıkları için Superpave karışım gradasyonu şartname ölçütleri olan kontrol noktaları ve yasak bölgeler ile karşılaştırılarak elde edilir. Deneme karışımları seçildiğinde, karışım agregasının kaynak özellikleri ile özgül ağırlık özelliklerinin değerlendirilmesi gerekir. Her deneme karışımı için hazırlanan asfalt beton numunelerinin hacimsel özellikleri belirlenir. Her deneme karışımı için öncelikle agrega karışımının efektif özgül ağırlığı (G_{se}) belirlenmektedir. Agrega karışımının efektif özgül ağırlığı aşağıdaki denklem ile hesaplanmaktadır: (Cominsky, 1994; Garber ve Hoel, 2009)

$$G_{se} = G_{sb} + 0,8 * (G_{sa} - G_{sb}) \quad (6.24)$$

Burada;

G_{se} = Agrega karışımının efektif özgül ağırlığı, (g/cm^3)

G_{sb} = Agrega karışımının hacim özgül ağırlığı, (g/cm^3)

G_{sa} = Agrega karışımının zahiri özgül ağırlığı, (g/cm^3)

Bu denklemdeki 0,8 katsayısı, tasarımcının yorumuna bağlı olarak değiştirilebilir. Absorbsiyonu yüksek olan agregalarda bu katsayı 0,6 veya 0,5'e kadar azaltılabilir. (Tunç, 2007)

Agrega tarafından absorbe edilecek olan bitüm hacmi (V_{ba}) aşağıdaki denklem ile hesaplanmaktadır:

$$V_{ba} = \frac{P_s * (1-V)}{\left(\frac{P_b}{G_b} + \frac{P_s}{G_{se}}\right)} * \left(\frac{1}{G_{sb}} - \frac{1}{G_{se}}\right) \quad (6.25) \quad (\text{Cominsky, 1994})$$

Burada;

V_{ba} : Absorbe edilen bitüm hacmi (karışıma göre, cm^3/cm^3)

P_b : Bitüm yüzdesi, % (0,05 alınabilir)

- P_s : Agrega yüzdesi, % (0,95 alınabilir)
 G_b : Bitüm özgül ağırlığı, g/cm³ (1,02 g/cm³ alınabilir)
 V : Hava boşluğu hacmi (karışıma göre, 0,04 cm³/cm³)

6.2.7.3. Karışımın hazırlanması ve sıkıştırılması

BSK'ların hazırlanması ve sıkıştırılması için bitümün iki değişik sıcaklıktaki viskozitesi ölçülür ve viskozite-sıcaklık grafiği çizilir. Karıştırma için 0,17±0,02 Pa.s, sıkıştırma için 0,28±0,03 Pa.s viskozite değerleri esas alınır. Ancak bu viskozite sınırları modifiye bitümler için geçerli değildir ve üretici firma önerileri göz önüne alınmalıdır (Harman vd., 2002; Tam, 2006; Asphalt Institute, 2007; FHWA,1997).

Bitüm belirlenen karıştırma sıcaklığına 2 ila 4 saatte erişecek şekilde ısıtılır. Sıcak bitüm ısıtılmış agrega üzerine dökülerek karıştırılır. Karışım bir tepsiye alınır ve 135°C'lik bir fırında 4 saat bekletilir. Böylece kısa dönem yaşlanma uygulanmış olur. İlk numunenin sıkıştırılmasından yaklaşık 45-60 dakika önce, sıkıştırma kalıbı, alt ve üst plakalar sıkıştırma sıcaklığına ayarlanmış bir etüve yerleştirilir. Daha sonra, karışım ısisına getirilen numune yoğurmalı sıkıştırıcı ile N_{max} dönüş sağlanana kadar sıkıştırılır ve gerekli veriler alınır (Tunç, 2007).

6.2.7.4. Verilerin değerlendirilmesi

Superpave yoğurmalı sıkıştırma verileri, istenen her yoğurma işlemi için hesaplanmış hacim özgül ağırlık, düzeltilmiş hacim özgül ağırlık ve düzeltilmiş maksimum teorik özgül ağırlık yüzdesi hesaplanarak analiz edilir. Sıkıştırma esnasında numune yüksekliği sürekli olarak her dönüş için yazılım tarafından ölçülerek kaydedilir. Sıkıştırılmış numunenin hacim özgül ağırlığı (G_{mb}) ve sıkıştırılmamış (gevşek) numunenin maksimum teorik özgül ağırlığı (G_{mm}) ölçülür. Herhangi bir yoğurma değeri için hesaplanan tahmini hacim özgül ağırlık değeri olan $G_{mb(tahmini)}$, karışım ağırlığının numunenin hacmine bölünmesi ile elde edilir.

$$G_{mb(tahmini)} = \frac{\left(\frac{W_m}{V_{mx}}\right)}{\gamma_{su}} \quad (6.26) \quad (\text{Garber ve Hoel, 2009})$$

Burada;

$G_{mb(tahmini)}$: Numunenin sıkıştırma sırasındaki hesaplanan tahmini hacim özgül ağırlığı,

W_m : Numunenin ağırlığı (g),

γ_{su} : Suyun yoğunluğu (1 g/cm³),

V_{mx} : Numunenin hacmi (cm³),

$$V_{mx} = \frac{\pi \cdot d^2}{4} * h_x \cdot 0,001 \text{ cm}^3/\text{mm}^3$$

d : Kalıbın çapı (100 mm veya 150 mm),

h_x : Sıkıştırma esnasında numunenin yüksekliği (mm)'dir.

Bu hesaplama, numune kenarlarının düzgün ve boşluksuz olduğunu kabul eder ancak gerçekte böyle değildir. Numune yüzeyindeki pürüz ve boşluklar, numune hacminin düzgün kenarlı bir silindirin hacminden daha düşük olmasına sebep olur. Bu sebeple, hesaplanan tahmini hacim özgül ağırlığı ($G_{mb(tahmini)}$), ölçülen hacim özgül ağırlığı ($G_{mb(ölçülen)}$) ile oranlanarak bir düzeltme faktörü (C) değeri hesaplanır (Garber ve Hoel, 2009).

$$C = \frac{G_{mb(ölçülen)}}{G_{mb(tahmini)}} \quad (6.27)$$

Düzeltilme faktörü kullanılarak, istenen yoğurma sayısındaki düzeltilmiş hacim özgül ağırlık değeri hesaplanır.

$$G_{mb(düzeltilmiş)} = C * G_{mb(tahmini)} \quad (6.28) \text{ (Garber ve Hoel, 2009)}$$

$G_{mb(düzeltilmiş)}$: Herhangi bir yoğurma için düzeltilmiş hacim özgül ağırlığı,

Düzeltilmiş maksimum teorik özgül ağırlık yüzdesi (% G_{mm}) değeri, düzeltilmiş hacim özgül ağırlığın ($G_{mb(düzeltilmiş)}$), ölçülen teorik maksimum özgül ağırlığına ($G_{mm(ölçülen)}$) oranlanması ile bulunur.

$$\%G_{mm} = \frac{G_{mb} \text{ (düzeltilmiş)}}{G_{mm} \text{ (ölçülen)}} \quad (6.29)$$

Superpave tasarımında, N_{ini} , N_{des} ve N_{maks} değerleri belirli bir proje için tasarım trafik düzeyi ve ortalama yüksek sıcaklık ile belirlenmiştir. Superpave hacimsel tasarım kriterleri olan VMA, VFA ve filler oranı, tasarım yoğurma sayısı olan N_{des} 'da karışımın %4'lük hava boşluğu içeriğine sahip olması esasına dayanmaktadır. N_{ini} , N_{des} ve N_{maks} yoğurma sayıları için karışım yoğunluğu şartları bulunmaktadır.

Tasarım yoğurma sayısındaki (N_{des}) hava boşluğu yüzdesi (V) aşağıdaki denklem ile hesaplanabilir: (Garber ve Hoel, 2009)

$$V = 100 - \%G_{mm}@N_{des} \quad (6.30)$$

V: Toplam hacmin yüzdesi olarak N_{des} 'daki hava boşluğu, (%)

$\%G_{mm}@N_{des}$: N_{des} 'daki maksimum teorik özgül ağırlık oranı, (%)

Mineral agregadaki boşluk yüzdesi ise aşağıdaki denklem ile hesaplanabilir:

$$\%VMA = 100 - \left(\frac{\%G_{mm} @ N_{des} * G_{mm} * P_s}{G_{sb}} \right) \quad (6.31)$$

$\%G_{mm}@N_{des}$: N_{des} 'daki maksimum teorik özgül ağırlık oranı, (%)

G_{mm} : Maksimum teorik özgül ağırlık, (g/cm³)

G_{sb} : Toplam agreganın hacim özgül ağırlığı, (g/cm³)

P_s : Toplam karışımın ağırlıkça yüzdesi olarak agrega içeriği (cm³/cm³)

Karışımın hava boşluğu yüzdesi %4'e eşit bulunduğunda, bu veriler hacimsel şartname kriterleri ile karşılaştırılır ve bu karışımın bir analizi tamamlanmış olur. Tasarım yoğurma sayısında (N_{des}) bulunan hava boşluğu yüzdesi genellikle %4'ten farklı çıktığından, tasarım yoğurma sayısındaki hava boşluğu %4 olan tahmini bir bitüm içeriği hesaplanarak belirlenir. Hesaplanan bitüm içeriğindeki tahmini tasarım özellikleri hesaplanır. Tasarım yoğurma sayısında hava boşluğu %4 olan tahmini bitüm içeriği aşağıdaki denklem ile hesaplanır: (Garber ve Hoel, 2009)

$$P_{b(tahmini)} = P_{bi} - (0,4 \times (4 - V)) \quad (6.32)$$

$P_{b(tahmini)}$: Karışım ağırlığının yüzdesi olarak tahmini bitüm içeriği,

P_{bi} : Karışım ağırlığının yüzdesi olarak deneme (başlangıç) bitüm içeriği,

V : Tasarım yoğurma sayısındaki hava boşluğu yüzdesi (deneme).

Tasarım yoğurma sayısındaki (N_{des}), hacimsel özellikler olan VMA, VFA ve başlangıç yoğurma sayısı (N_{ini}) ile maksimum yoğurma sayısındaki (N_{maks}) karışım yoğunlukları bu deneme bitüm içeriği için aşağıdaki denklemler ile hesaplanabilir: (Tunç, 2007)

$$\%VMA_{(tahmini)} = \%VMA_{(başlangıç)} + C * (4 - V) \quad (6.33)$$

$\%VMA_{(başlangıç)}$: Deneme bitüm içeriğindeki karışımın agrega boşlukları yüzdesi,

C : sabit katsayı, (hava boşluğu yüzdesi $\%4$ 'ten az ise 0.1; yüksek ise 0.2 alınır.)

$$VFA_{(tahmini)} = 100 * \frac{(\%VMA_{(tahmini)} - 4,0)}{\%VMA_{(tahmini)}} \quad (6.34) \text{ (Tunç, 2007)}$$

$$\% G_{mm(tahmini)}@N_{ini} = \%G_{mm(deneme)}@N_{ini} - (4,0 - V) \quad (6.35)$$

$$\% G_{mm(tahmini)}@N_{maks} = \%G_{mm(deneme)}@N_{maks} - (4,0 - V) \quad (6.36)$$

Diğer bir superpave karışım gereksinimi de DP ile ifade edilen filler veya toz oranıdır. Bu değer, 0,075 mm'lik elekten geçen filler malzemesinin agrega karışım ağırlığının yüzdesinin ($P_{0,075}$), toplam karışım ağırlığının yüzdesi olarak hesaplanan efektif bitüm içeriğine ($P_{be(tahmini)}$) oranı olarak aşağıdaki denklem ile hesaplanabilir: (Tunç, 2007)

$$DP = P_{0,075} / P_{be(tahmini)} \quad (6.37)$$

Sonuç olarak, başlangıçta değerlendirmeye alınan üç farklı agrega karışımı için başlangıç bitüm içeriklerinde hazırlanan numunelerin yukarıda ifade edilen tahmini değerleri hesaplandıktan sonra bu değerler şartname kriterleri ile ayrı ayrı karşılaştırılır.

Tasarımcı, bu deneme karışımlarından şartname kriterlerini sağlayan en uygun karışımı tespit ederek tasarım agrega gradasyonunu kabul eder veya başka deneme karışımlarının yapılmasına karar verir.

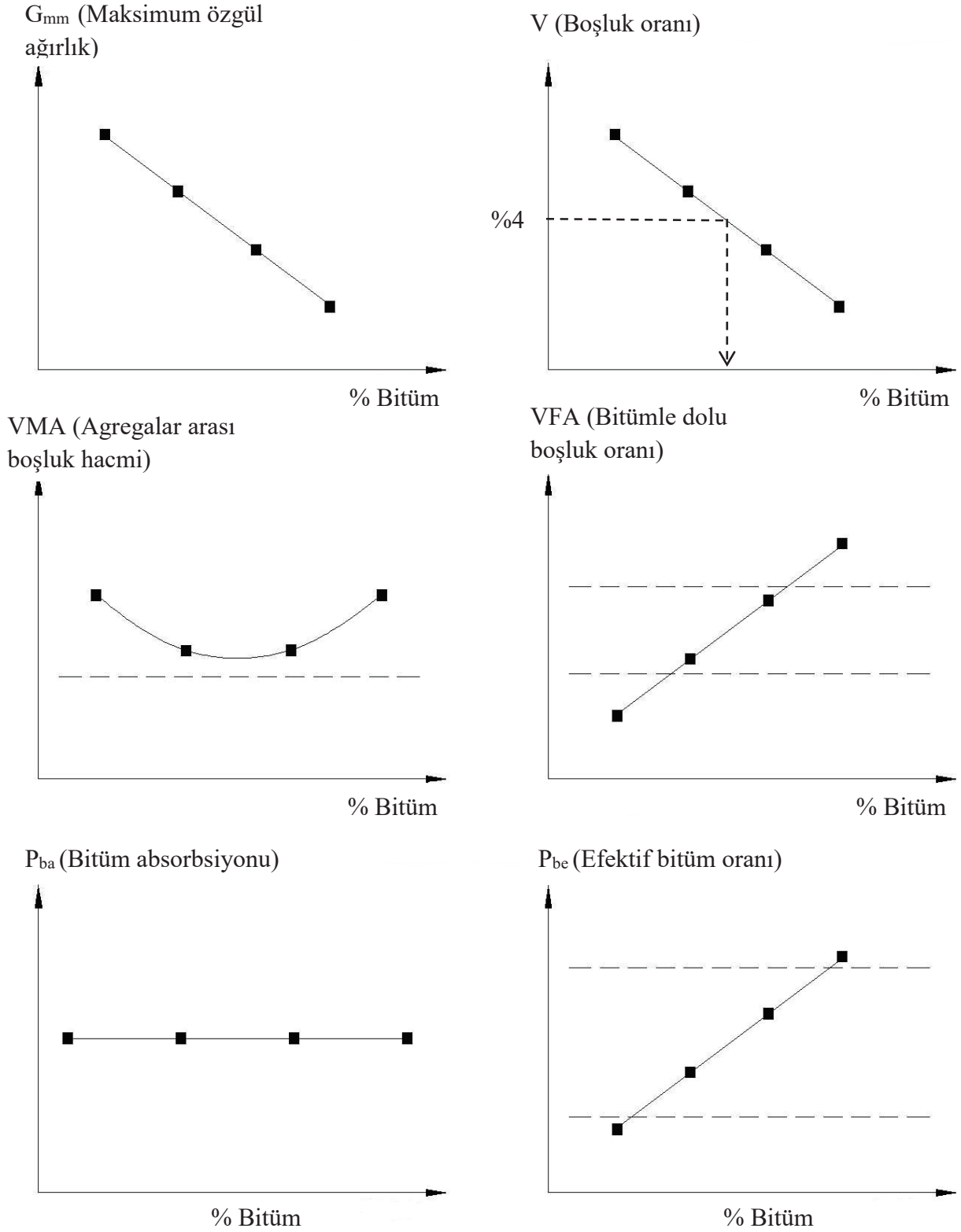
6.2.7.5. Tasarım bitüm içeriği

Superpave tasarımında tasarım agrega gradasyonu seçildikten sonra, deneme karışımının tahmini bitüm içeriğinde, $-0,5\%$; $+0,5\%$ ve $+1,0\%$ olmak üzere dört farklı bitüm içeriği için en az iki numune hazırlanır. Ayrıca en az iki numune tahmini bitüm içeriğinde karışımın maksimum teorik özgül ağırlığının tayini için hazırlanır. Tasarım yoğurma sayısındaki G_{mb} değerleri, $\%G_{mm}$, V , VMA , VFA ve filler oranı değerleri her bitüm yüzdesi için hesaplanarak V , VMA ve VFA grafikleri bitüm oranına bağlı olarak çizilir. Tasarım bitüm içeriği, karışımın hava boşluğu yüzdesi $\%4$ olacak şekilde belirlenir ve diğer tasarım değerleri tasarım bitüm oranına göre tespit edilerek şartname kriterleri ile karşılaştırılır. BSK'ların analizinde hesaplanan hacimsel özelliklerin, karışımda kullanılan bitüm içeriğine göre değişimi Şekil 6.25'deki gibi grafiklerle ifade edilebilir (McGennis vd., 1995; Geçkil, 2008).

Ayrıca son olarak, tespit edilen tasarım bitüm içeriğinde en az iki karışım hazırlanarak maksimum yoğurma sayısında (N_{maks}) sıkıştırılır ve yoğunluk özellikleri şartname kriterleri ile karşılaştırılır (Geçkil, 2008).

6.2.7.6. Nem hassasiyeti

Asfalt beton karışımın nem hassasiyeti; bitüm ile agrega arasında tabaka oluşturacak şekilde suyun asfalt beton yapısı içerisine sızmasına meyilli olması ile ilişkilidir. Bitüm filminin agrega danelerinden bu şekilde ayrılmasına soyulma adı verilir. Soyulma, bitüm ile agrega arasındaki adezyon kaybı veya zayıflamasından kaynaklanır. Bitüm ile agrega arasındaki bağ olan adezyon kaybolmaya başladıktan sonra, asfalt beton karışımın dayanımındaki azalma çok fazla olmaktadır (Speight, 2016). BSK'ların soyulma açısından değerlendirilebilmesi için nem hassasiyeti deneyinden yararlanılmakta olup, deney ASTM D4867 veya AASHTO T 283 standartlarına uygun olarak yürütülmektedir.



Şekil 6.25. Değişen bitüm içeriğinin hacimsel özellikler üzerindeki etkisi (McGennis vd., 1995; FHWA,1997; Hossain, 2016)

Soyulma, suyun aşağı yönlü hareket ederek kaplamanın alt bölgesindeki boşluklara yerleşmesi nedeniyle ilk olarak asfalt beton tabakanın altında görülmektedir. Soyulma nedeniyle oluşacak hasarın azaltılabilmesi için uygun karışım tasarımı yapılması oldukça önemlidir. Ancak, doğru karışım tasarımı yapılsa bile, inşaat sahasında uygun olmayan sıkıştırma yapıldığı takdirde soyulma oluşabilecektir. Az sıkıştırılan asfalt beton karışımlarda gerekenden fazla oranda hava boşluğu olacaktır. Bu boşluklar, suyun kaplama içerisine girmesi ve yerleşmesi için yer sağlamaktadır. Uygun şekilde sıkıştırılan asfalt beton karışımlar suyun yerleşebileceği daha az boşluk içermektedir. Hava boşluğu oranı %5'in altında olan karışımlar, suyun asfalt beton içerisine sızmasını önemli ölçüde azaltacaktır (Speight, 2016).

Sıcaklık, su ve hava gibi çevresel faktörler asfalt beton kaplamaların durabilitesi üzerinde önemli etkiye sahiptirler. Bunların içerisinde su ana etkidir. Nem hasarı; asfalt beton karışımlarda bitüm ve agrega yüzeyi arasındaki adezyon kaybı ve/veya büyük oranda suyun etkisine bağlı olarak bitüm bünyesindeki kohezyon kaybı nedeniyle oluşan ve giderek artan bozulmalardır. Nem hasarı; malzeme özellikleri, karışım kompozisyonu, kaplama drenaj durumu, trafik yükleri ve çevresel karakteristikler gibi çeşitli faktörlerden etkilenen karmaşık bir olaydır (Lu, 2005).

Superpave karışım tasarım işleminin son aşaması, tasarlanan karışımın neme karşı hassasiyetinin tespit edilmesini kapsar. Bu işlem, tasarım bitüm içeriğinde ortalama %7 hava boşluğuna sahip olarak hazırlanmış asfalt beton numunelerinin modifiye lottman deneyine (AASHTO T 283) tabi tutulması ile yapılmaktadır. Superpave tasarım yönteminde, asfalt beton karışımların nem hassasiyet ölçüsünün en az %80 olması istenmektedir (McGennis vd., 1995; Asphalt Institute, 2007).

6.2.7.7. Durabilite

Asfalt beton kaplamanın durabilitesi; asfalt betonun yaşlanma, agreganın parçalanma ve bitüm film tabakasının agrega yüzeyinden soyulması gibi faktörlere direnme yeteneğidir. Bu faktörler; hava, trafik veya ikisinin birleşiminden kaynaklanır (Chadborn vd., 2000).

BSK'nın durabilitesi, karışımın orijinal özelliklerini sürdürebilme yeteneği olarak da adlandırılabilir. Yüke ve aşınmaya karşı direnç de bu kapsamdadır. Aşağıdaki durumlarda yüke karşı direnç azalabilir:

- BSK sertleşerek kırılgan hale geldiğinde, kırılmadan şekil değişimlerine karşı koyamaz.
- Bitüm ile agregası arasındaki bağın zayıflaması (soyulma) neticesinde yüzey dayanımını kaybeder ve neticesinde bozulmalar oluşur (çatlama, parçalara ayrılarak dağılma vb.) (Chadbourn vd., 2000).

Genellikle karışımların durabilitesi üç farklı yol ile geliştirilebilir: (Asphalt Institute, 2007)

- Yoğun gradasyonlu bir karışım tasarımı ve nem dayanımı yüksek agregası kullanımı,
- Agregası yüzeyindeki bitüm film kalınlığının artırılması,
- Karışımın yerinde %8 veya daha az hava boşluğu ile sıkıştırılması.

Sağlamlık veya sertlik; agregasının karıştırma, yerleştirme, sıkıştırma ve trafik yükleri altında kırılma ve ayrışmaya dayanma kabiliyetidir (Hicks vd. 2003).

7. MATERYAL VE YÖNTEM

7.1. Çalışmada Kullanılan Katkılar ve Özellikleri

Çalışma kapsamında bitümü modifiye etmek amacıyla ETİ Maden İşletmelerinden temin edilen Bigadiç Kolemaniti ve KÜMAŞ Manyezit Sanayi A.Ş.'den temin edilen Magnezyum spinel oksit kullanılmıştır.

7.1.1. Kolemanit ve özellikleri

Kolemanit ($2\text{CaO} \cdot 3\text{B}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) bor mineralleri arasında en yaygın bulunanıdır. Mohs sertlik sınıflandırmasına göre sertliği 4-4,5; özgül ağırlığı $2,42 \text{ g/cm}^3$ 'dür. Suda yavaş, HCl'de hızlı çözünür.

Bütün dünyada ekonomik olarak bilinen üç önemli bor minerali vardır; boraks, üleksit ve kolemanit. Bu üç mineral, dünya borat ihtiyacının yaklaşık %90'ını karşılayan başta Türkiye ve ABD olmak üzere çok sınırlı sayıdaki ülkelerde üretilmektedir. Dünya ülkeleri kolemanit üretimi yönünden tamamen Türkiye'ye bağımlıdır. Türkiye'de Emet, Bigadiç ve Kestelek bölgelerinde bulunmaktadır (Helvacı, 2004).

Kolemanit camın üretiminde ergime derecesini düşürücü, ısıl şoklara karşı direncini ve ısıl genleşme katsayısını arttırıcı madde olarak kullanılmaktadır. Ayrıca seramik ve emaye sır üretiminde de kullanılmaktadır. Hemen hemen tüm metal oksitler için bir çözücü olması sebebiyle metalurji sanayiinde flaks (cüruf çöktürücü) olarak kullanılmaktadır.

Demir çelik sektöründe tozlaşan cürufa kolemanit ilave edilerek camsı kompakt yapıda cüruf elde edilmektedir. Üretimine bir dönüştürücü veya elektrikli fırında başlanan sıvı çelik, fırın kapağındaki bir musluk yardımıyla pota içine akıtılır. Değeri yüksek çelik elde etmek için potada yer alan sıvı çeliğin vakumlanması gerekir. Buna pota metalürjisi ya da ikincil metalürji denir.

Pota metalürjisinde oluşan ve soğuduktan sonra tozlaşan cüruf, fazla ıslanma ve sıkışma özelliği olmadığından taşımada, stoklamada ve çevre açısından problem oluşturmaktadır. Bu durum işletmelere ek maliyet getirmektedir. Çelik üretiminde pota fırınına kolemanit ilavesi ile cüruf kompakt bir yapıya kavuşturulmakta ve bu sorunlar en az seviyeye indirilmektedir. Bu sayede demir-çelik sektöründe kolemanit kullanımı yaygınlaşmaya başlamıştır. Pota metalürjisinde ton çelik başına 10-30 kg civarında cüruf ortaya çıkmaktadır. Ortalama olarak dünyada ise 30 milyon ton tozlaşan pota cürufu ortaya çıktığı tahmin edilmektedir.

Kolemanit cam elyaf (teskil tipi cam elyaf) endüstrisinde de kullanılmaktadır. Tekstil tipi cam elyaf üretiminde sodyum istenmediği için borik asit ve kolemanit diğer bor ürünlerine göre tercih edilmektedir. Kolemanitin deterjan ve kozmetik sanayinde de oldukça fazla kullanım alanı bulunmaktadır.

Ülkemizin önemli yeraltı zenginliklerinden biri olan kolemanit mineralinin asfalt betonu üretiminde performans iyileştirici katkı maddesi olarak kullanılabilmesi, hem kolemanit için yeni bir kullanım alanı oluşturacak hem de ülke ekonomisine ciddi katkı sağlayabilecektir. Kolemanitin kimyasal özellikleri Çizelge 7.1’ de verilmiştir.

Çizelge 7.1. Kolemanit kimyasal özellikleri (ETİ MADEN, 2015)

İçerik	Birim	Değer
B ₂ O ₃	%	40,0±0,50
CaO	%	27,0±1,0
SiO ₂	%	4,0-6,5
SO ₄	%	0,60 max.
As	mg/kg	35 max.
Fe ₂ O ₃	%	0,08 max.
Al ₂ O ₃	%	0,40 max.
MgO	%	3,0 max.
SrO	%	1,5 max.
Na ₂ O	%	0,35 max.

7.1.2. Magnezyum spinel oksit ve özellikleri

Magnezyum spinel oksidin mohs sertlik sınıflandırmasına göre sertliği 7,5-8,0; özgül ağırlığı ise 3,6-4,0 g/cm³'dir. Mg Spinelin ergime sıcaklığı 2135°C'dir. Yüksek ergime sıcaklığı nedeniyle yüksek ısıya dayanıklı refrakter tuğlaların üretiminde kullanılmaktadır (Uğur ve Aksel, 2009).

Oksidasyona dayanıklı malzemeler olduğu bilindiğinden, bitümün yaşlanmasını azaltıcı yönde etkisi olabileceği değerlendirilmektedir. Bitümün ısıl genleşme ve mekanik özelliklerini iyileştirici etkileri olabileceğinden katkı olarak kullanılmasına karar verilmiştir.

7.2. Çalışma Kapsamında Nano Malzeme Üretimi

Toz partiküllerin mekanik aşındırma (MA) yöntemi ile üretimi 1970'li yıllarda endüstriyel uygulamalar için geliştirilmiştir. Bu amaç için kullanılan çeşitli bilyalı öğütücüler mevcuttur. Bunlar; aşındırma, gezegen, titreşimli ve yüksek enerjili bilyalı (Spex tipi yüksek enerji çarpmalı 3 boyutlu bilyalı çalkalama değirmeni) değirmenlerdir. Çalışma kapsamında nano malzeme üretilmesi için Şekil 7.1' de gösterilen ETİ Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü ve Gazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Laboratuvarlarında mevcut Spex tipi yüksek enerji çarpmalı 3 boyutlu bilyalı çalkalama değirmeninden faydalanılmıştır.



Şekil 7.1. 3 boyutlu Spex çalkalama cihazı (Eti Maden laboratuvarı)

Malzemelerin nano boyuta daha kısa sürede inilebilmesi için ham haldeki katkı malzemeleri Şekil 7.2’ de gösterilen ETİ Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğündeki tablalı öğütme cihazı kullanılarak 20-30 mikron ortalama dane çapı olacak şekilde ön öğütme işlemine tabii tutulmuştur.



Şekil 7.2. Tablalı öğütme cihazı (Eti Maden işletmeleri laboratuvarı)

Mekanik aşındırma yönteminde, öncelikle deneme yanılma yöntemi ile Şekil 7.3’de gösterilen reaktörlerin içerisine öğütülmek üzere belirli miktarda katkı maddesi konulmuş, ağırlıkça 1:5 veya 1:7 oranlarında (katkı:bilya) çelik bilya konularak muhtelif süreler için deneme öğütmeleri yapılmıştır. Yapılan görüntüleme analizleri neticesinde, 1:7 oranında (katkı:bilya) çelik bilya kullanılmasına karar verilmiştir. Magnezyum spinel oksit için toplam öğütme süresi 8 saat, kolemanit için 6 saat seçilmiştir.



Şekil 7.3. Malzeme öğütmede kullanılan çelik reaktör ve muhtelif boyutta çelik bilyalar

Öğütme işlemleri öncesinde kolemanit ve magnezyum spinel oksit katkı malzemeleri Şekil 7.4' de gösterilmiştir.



Şekil 7.4. (a) Öğütme öncesi magnezyum spinel oksit

(b) Öğütme öncesi kolemanit

7.3. Görüntüleme Teknikleri

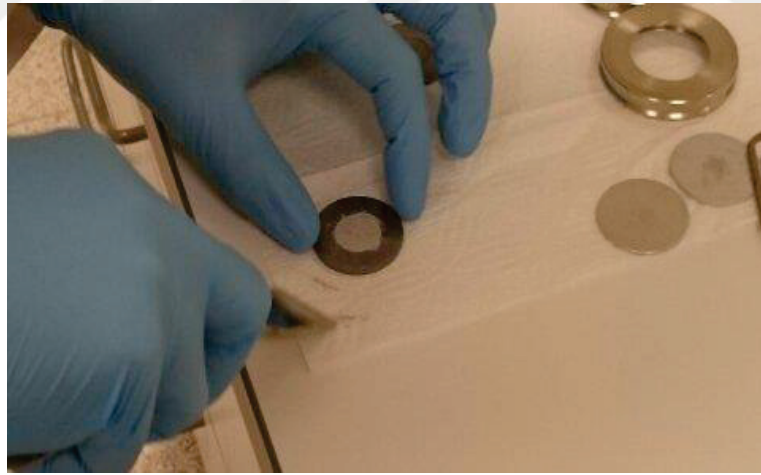
Bitüm modifiye edilmeden önce Zeta Seizer cihazı ile öğütülen katkı maddelerinin ortalama tane boyutu kontrolü yapılmış, öğütülen malzemelerin elementel birleşiminin kontrolü için Enerji Dağılımı Spektrometresi (EDS) analizinden yararlanılmıştır.

Mekanik aşındırma yönteminde en büyük risklerden biri; öğütme işleminde kullanılan çelik bilya veya reaktörden öğütülen malzeme içerisine safsızlık karışması (dışarıdan malzeme karışımı) olduğundan, öğütülen malzemelerin elementel birleşiminin EDS analizi ile kontrolü önem kazanmaktadır. Çalışmalarda Bilkent Üniversitesi Ulusal Nanoteknoloji Araştırma Merkezindeki (UNAM) SEM/EDS cihazından yararlanılmış olup, cihaz Şekil 7.5' de gösterilmiştir.



Şekil 7.5. EDS ve SEM analiz cihazı (UNAM)

Ayrıca öğütülen malzemelerde tane boyutunu belirlemek ve aglomerasyon (birikim) olup olmadığının tespiti için Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) analizi, katkı malzemelerinde ortalama kristalit boyutunun tayini için X Işını Kırınım (XRD) analizinden yararlanılmıştır. Şekil 7.6' da XRD cihazı için numune hazırlanması aşaması görülmektedir.



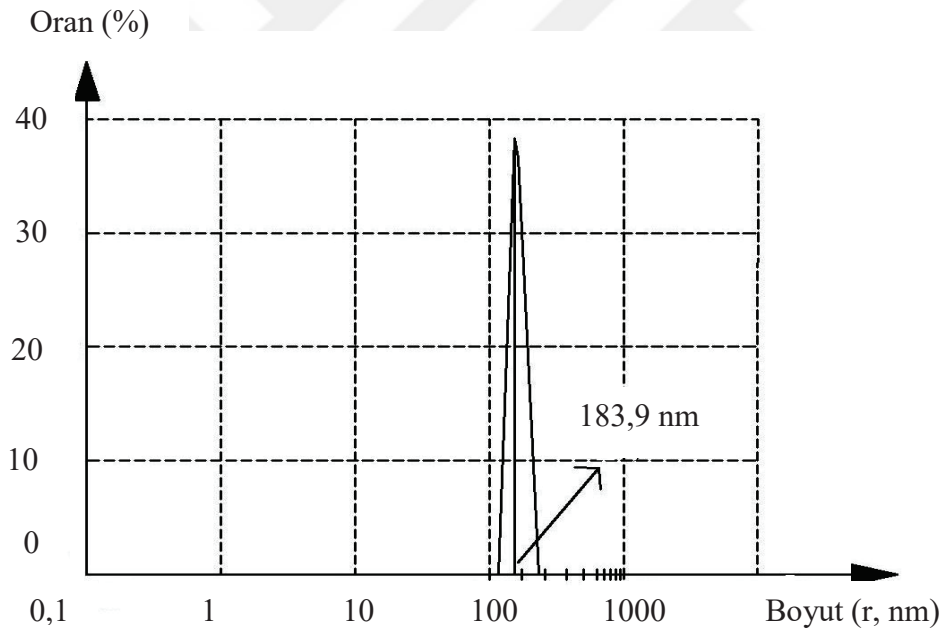
Şekil 7.6. XRD cihazı için numune hazırlanması

Dane boyut dağılımının tayin edildiği Zeta Seizer cihazı ile 0,6 nm - 6µm büyüklüğündeki taneler analiz edilebilmektedir. Öğütme işlemleri sonrası katkı maddelerinin ortalama tane boyutlarının tespiti için bu cihazın kullanımı en güvenilir yöntemdir. Ölçümler için Bilkent Üniversitesi Ulusal Nanoteknoloji Araştırma Merkezindeki (UNAM) Malvern marka cihazdan yararlanılmış olup, cihaz Şekil 7.7'de gösterilmiştir.



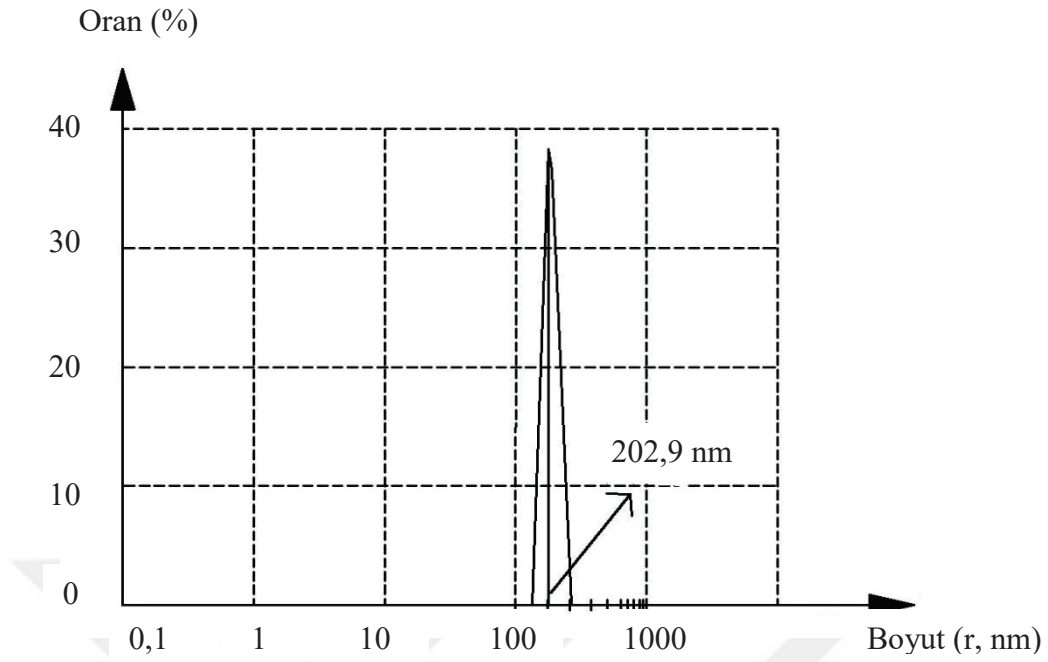
Şekil 7.7. UNAM laboratuvarındaki Zeta Seizer cihazı

Mg spinel oksit ve kolemanit için yapılan zeta seizer analiz sonuçları sırasıyla Şekil 7.8 ve Şekil 7.9’da verilmiştir.



Şekil 7.8. Mg spinel oksit zeta seizer analiz sonucu

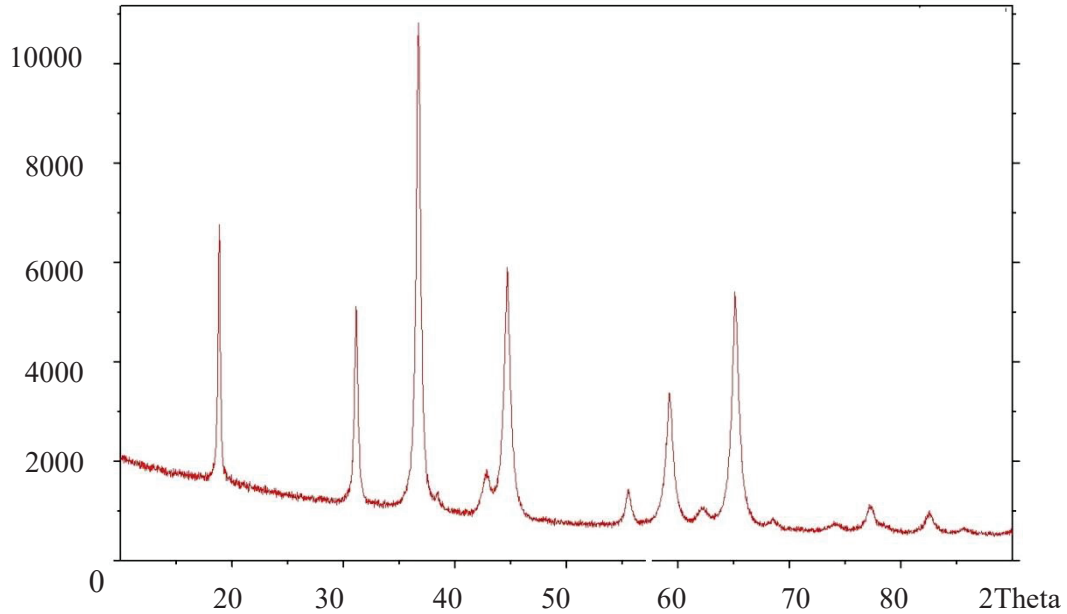
Öğütme işlemleri sonucunda mg spinel oksit için ortalama dane boyutu 184 nm, kolemanit için ortalama dane boyutu ise 203 nm’dir.



Şekil 7.9. Kolemanit zeta seizer analiz sonucu

X ışını kırınım (XRD) analiz sonuçlarından mg spinel oksit ve kolemanit için elde edilen kırınım desenleri sırasıyla Şekil 7.10 ve Şekil 7.11’de verilmiştir.

Şiddet (Intensity)

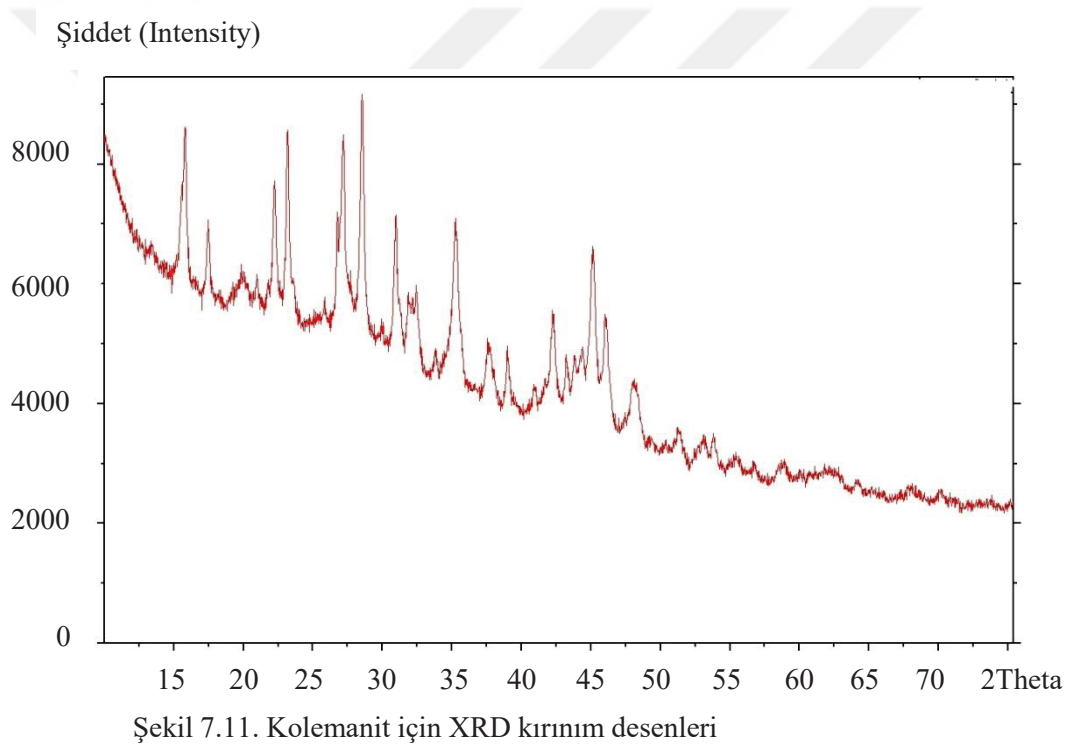


Şekil 7.10. Magnezyum spinel oksit için XRD kırınım desenleri

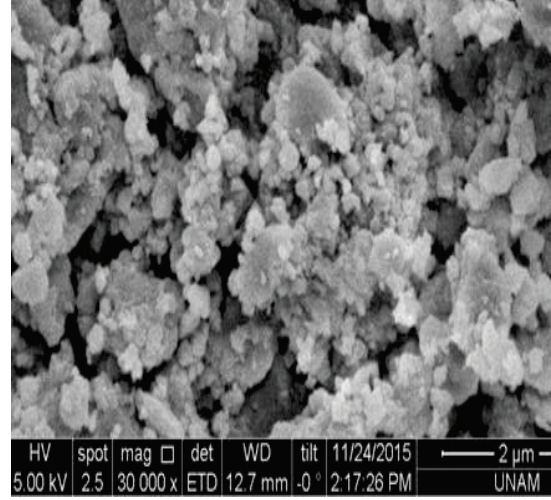
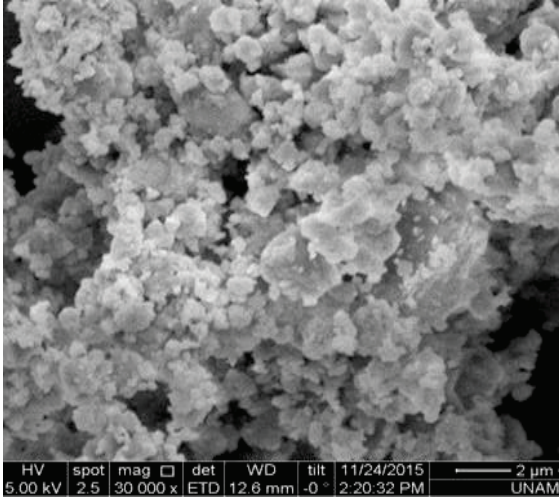
Bu bağlamda nano boyuttaki her iki katkı malzemesi için elde edilen XRD analiz sonuçları JCPDS (Joint Committee on Powder Diffraction Standards)’de bulunan ve kristal

yapısı bilinen malzeme ile karşılaştırılmıştır. Mg spinel oksit için JCPDS kart no: 21-11052 ve kolemanit için JCPDS kart no: 00-033-0267'deki referans patern ile mevcut analiz karşılaştırıldığında, piklerin yeri, şiddeti ve kırınım açıları göz önüne alındığında öğütme işleminin malzemenin kristal yapısında önemli bir değişikliğe neden olmadığı, ayrıca öğütülmüş malzeme içerisinde farklı fazların bulunmadığı tespit edilmiştir.

SEM analizi neticesinde mg spinel oksit ve kolemanit için elde edilen görüntüler sırasıyla Şekil 7.12 ve Şekil 7.13'de verilmiştir. Analiz sonuçlarına göre; öğütme işlemi sonrasında her iki malzemede de parçacıklar düzensiz şekilli, nano boyutta ve göreceli olarak aglomare olmuş durumdadırlar.



Magnezyum spinel oksit için EDS analiz sonuçları; ağırlıkça %20,21 magnezyum ve %38,16 alüminyum, kolemanit için EDS analiz sonuçları; ağırlıkça %2,59 magnezyum, %2,90 alüminyum, %8,14 silisyum, %10,86 kalsiyum içerdiği şeklindedir.



Şekil 7.12. Mg spinel oksit için SEM görüntüsü Şekil 7.13. K Colemanit için SEM görüntüsü

7.4. Katkı Maddelerinin Bitüm Üzerindeki Etkileri

Bitüm apolar özellikte bir hidrokarbondur. Agregalar ise polar yapıda olan doğal minerallerdir. “Kimyada benzer benzeri çözer, benzerinden etkilenir.” ilkesinden kaynaklanarak bitümün apolar özelliği nedeniyle katkı maddesi yardımıyla yüzeyinde polar kutuplar oluşturulmaktadır. Böylece bitüm yüzeyinde oluşan polar uçlar, agrega yüzeyindeki polarlıkla kolaylıkla etkinleşmekte, aderans kuvvetler artmaktadır. Katkı maddesinin partikül boyutunun küçük olması yüzey alanını ve yüzey kimyasını artırmaktadır. Bu sebeple katkıların nano boyuta indirgenmesi özgül yüzey alanını oldukça artırmaktadır. Bunun sonucu olarak agreganın bitümle kaplanan yüzey alanları artmakta, soyulma azalmaktadır.

Kolemanit (kalsiyum boraks) suda çözünmez ancak asitte çözünebilir. Bu sebeple hidroforik (suyu sevmeyen) özelliği ön plana çıkarak neme dayanıklılığı oldukça yüksek çıkmaktadır. Kolemanit tanecikleri ile bitüm fazları arasında ara etkileşim bölgesi (jelleşme) oluşmakta, dolayısıyla kalsiyum boraks bitüm ile kuvvetli olarak bağlanmaktadır, tanecikler askıda kalarak kararlı bir yapı izlemektedir.

Gürü vd. (2017) tarafından yapılan bir çalışmada; bor oksit bileşiğinin bitümün polar yapısını nasıl etkilediği gösterilmiş, performans özelliklerini ve nicholson deneyleri neticesinde soyulma direncini artırdığı tespit edilmiştir. Bu durumun benzer yapıdaki

kolemanit için de geçerli olması ve içerisindeki bor oksitin etkisi ile bitüm agrega arasındaki aderansın artması, soyulmanın önlemesi beklenen bir sonuçtur.

Magnezyum spinel oksidin ağırlıklı olarak magnezyum ve alüminadan oluştuğu değerlendirildiğinde; literatürde Al_2O_3 ile yapılan çalışmalara bakıldığında, Mubarakı vd. (2016) tarafından yapılan çalışmada; 60/70 penetrasyon bitüm ağırlıkça %3, 5 ve 7 katkı oranlarında nano alüminyum oksit ile modifiye edilmiştir. Viskozite deney sonuçlarına göre, $135^{\circ}C$ sıcaklıkta %5 Al_2O_3 ile modifiye edilen numunelerde normal bitüme göre viskozitedeki artış %74 mertebesinde dir. %5 Al_2O_3 ile modifiye edilen numunelerde yüksek sıcaklıklarda tekerlek izi direncindeki artış %59'dur.

Bu bağlamda katkı malzemesi olarak magnezyum spinel oksit kullanımı ile bitümün Al_2O_3 ile modifiye edilmesi neticesinde elde edilen sonuçlara benzer şekilde bitüm viskozitede artış olması ve yüksek sıcaklık tekerlek izi direncinin artması beklenen bir durum olmaktadır.

7.5. Bitüm Seçilmesi

Superpave karışım tasarım yönteminde malzeme seçimi (bitüm ve agrega) ve karışım tasarımı yapılırken coğrafi bölge, hava sıcaklıkları, trafik sayısı ve kaplama kalınlığı bilgileri esas alınmaktadır.

Bu amaçla uygulama bölgesi olarak Antalya ili seçilmiş, enlem derecesi olarak Meteoroloji Müdürlüğü kayıtlarında esas alınan $36^{\circ}53'$ değeri alınmıştır.

7.5.1. Proje hava şartlarının tespit edilmesi

Antalya 4. Meteoroloji Bölge Müdürlüğünden Antalya için son 20 yıllık en yüksek 7 günlük ve en düşük 1 günlük hava sıcaklık değerleri alınmış ve söz konusu değerler Çizelge 7.2' de verilmiştir.

Çizelge 7.2 Antalya için son 20 yıllık en yüksek ve en düşük sıcaklık değerleri

Tarih	Yüksek Sıcaklık (°C)							Tarih	Düşük Sıcaklık
	1.Gün	2.Gün	3.Gün	4.Gün	5.Gün	6.Gün	7.Gün		
01-07 Tem 1997	35,7	37,5	39,4	40,3	39,4	40,4	37,4	06.Şub.97	-3,0
03-09 Ağu 1998	42,6	42,4	42,4	42,3	43,0	41,9	41,7	10.Oca.98	0,0
19-25 Tem 1999	34,0	38,4	38,8	38,3	37,8	38,4	38,0	20.Şub.99	0,2
03-09 Tem 2000	40,8	41,7	43,0	45,0	42,1	42,4	40,4	28.Oca.00	-0,2
05-11 Ağu 2001	39,6	33,6	36,0	38,8	43,3	42,2	42,8	21.Şub.01	1,6
06-12 Ağu 2002	40,4	38,0	33,2	35,0	34,4	40,4	40,0	10.Oca.02	0,2
17-23 Ağu 2003	41,4	42,5	40,8	39,8	39,0	39,0	39,0	11.Şub.03	1,6
06-12 Tem 2004	40,8	41,0	31,8	41,0	40,8	41,0	40,8	15.Şub.04	-4,0
16-22 Tem 2005	31,2	36,0	37,4	38,6	40,6	41,0	32,4	11.Şub.05	0,8
17-23 Ağu 2006	33,3	35,2	43,5	42,5	42,7	42,2	36,3	16.Şub.06	0,2
23-29 Haz 2007	39,8	42,8	42,8	43,4	44,8	42,2	41,3	02.Oca.07	-0,5
02-08 Ağu 2008	39,7	39,4	39,9	41,4	40,5	42,0	41,2	01.Şub.08	-0,9
20-26 Tem 2009	41,7	40,2	40,4	40,8	42,0	42,1	41,5	02.Oca.09	-0,6
15-21 Ağu 2010	40,7	41,6	40,6	34,5	33,7	35,7	42,7	06.Şub.10	-0,9
04-10 Ağu 2011	36,2	38,7	38,4	37,6	40,0	41,5	39,4	03.Şub.11	0,4
11-17 Tem 2012	39,2	40,2	40,5	41,8	41,8	42,9	38,0	02.Şub.12	-1,9
14-20 Ağu 2013	39,6	39,5	39,0	38,5	38,7	39,0	38,6	15.Ara.13	-0,2
21-27 Ağu 2014	35,0	41,5	41,6	41,2	35,7	33,8	32,2	05.Şub.14	0,1
14-20 Tem 2015	36,8	39,0	40,1	40,1	39,8	40,6	39,0	10.Oca.15	-1,3
19-25 Haz 2016	40,1	39,8	42,1	40,5	41,4	41,8	40,0	26.Oca.16	-3,0

7.5.2. Güvenirliğin seçilmesi

Son 20 yıldaki her yılın en yüksek 7 günlük sıcaklık periyotlarının aritmetik ortalaması (140 değer) alınarak yüksek hava sıcaklığı, en düşük 1 günlük sıcaklık değerlerinin aritmetik ortalaması (20 değer) alınarak düşük hava sıcaklık değerleri belirlenmiş ve her iki sıcaklık değerinin standart sapması hesaplanmıştır.

Hesaplanan yüksek ve düşük hava sıcaklıklarının ortalama değeri ve standart sapması Çizelge 7.3' de verilmiştir.

Çizelge 7.3. Sıcaklık ortalamaları ve standart sapmaları

Hesaplamalar	Yüksek Sıcaklık	Düşük Sıcaklık
Ortalama Sıcaklık (°C)	39,6	-0,6
Standart Sapma (°C)	2,8	1,5

Superpave sistemine göre, ortalama yüksek veya en düşük sıcaklığa bir standart sapma ilavesi ile %84, iki standart sapma ilavesi ile %97,5 (98 alınmaktadır) ve üç standart sapma ilavesi ile %99,8 güvenirlilik elde edilmektedir. Ancak bitüm seçiminde genellikle iki

standart sapma ilavesi ile elde edilen %98 güvenilirlik derecesi kullanılmaktadır (Harman vd., 2002; Geçkil, 2008).

7.5.3. Hava sıcaklığının seçilmesi

Antalya bölgesine ait Çizelge 7.2' de verilen düşük ve yüksek hava sıcaklık değerlerinin değerlendirilmesi neticesinde; normal bir yaz mevsiminde, 7 günlük en yüksek hava sıcaklığı ortalaması 39,6°C ve standart sapması 2,8°C olan Antalya için, ortalama sıcaklığa iki standart sapma ilave edilmesiyle elde edilen 45,2°C'lik sıcaklığa, çok sıcak geçen bir yaz mevsiminde ulaşılma ihtimali %2'dir ve bu durumda güvenilirlik %98 olarak kabul edilir.

Normal bir kış mevsiminde ortalama en düşük sıcaklığı -0,6°C ve standart sapması 1,5°C olan Antalyada çok soğuk bir kış mevsiminde sıcaklığın -3,6°C olması ihtimali %2, dolayısıyla güvenilirlik derecesi %98 olacaktır.

7.5.4. Hava sıcaklıklarının kaplama sıcaklıklarına dönüştürülmesi

Superpave yönteminde, bitüm sınıfının seçilmesinde kullanılacak tasarım sıcaklığı olarak kaplamanın kendi sıcaklığı esas alınmaktadır. Ortalama en yüksek 7 günlük hava sıcaklığı esas alınarak kaplama yüzeyinden 20 mm derinlikteki yüksek tasarım sıcaklığı ve en düşük bir günlük ortalama sıcaklık esas alınarak kaplama yüzeyindeki düşük tasarım sıcaklığı SHRP yöntemine göre aşağıda belirtildiği şekilde hesaplanmıştır.

SHRP yöntemine göre kaplama yüzeyinden 20 mm derinlikteki kaplama yüksek tasarım sıcaklığı ve kaplama yüzeyi düşük tasarım sıcaklığı;

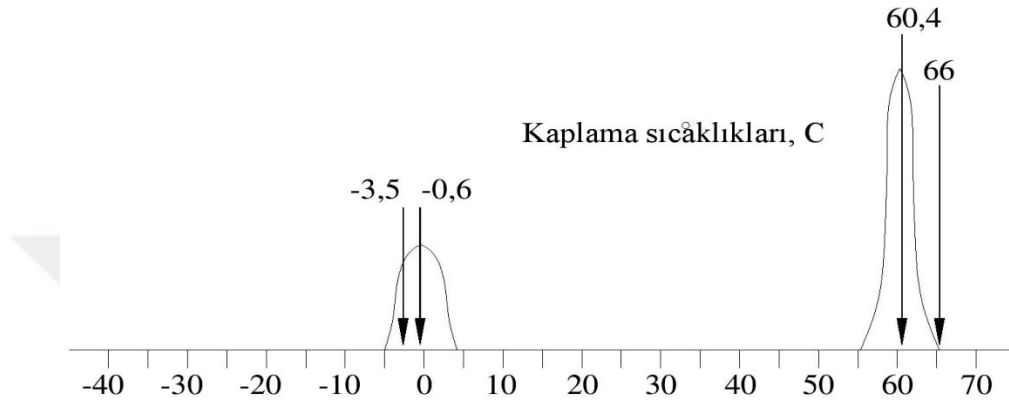
$$\begin{aligned} T_{20\text{mm}} &= (T_{\text{havamaks}} - 0,00618 * E^2 + 0,2289 * E + 42,2) * (0,9545) - 17,78 \\ &= (39,6 - 0,00618 * 36,53^2 + 0,2289 * 36,53 + 42,2) * (0,9545) - 17,78 = \mathbf{60,4^\circ C} \\ T_{\text{min}} &= T_{\text{havamin}} = \mathbf{-0,6^\circ C} \end{aligned}$$

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

$$T_{20\text{mm}\%98} = T_{20\text{mm}\%50} + 2S_{\text{max}} = 60,4 + 2 * 2,8 = \mathbf{66^\circ\text{C}}$$

$$T_{\text{min}\%98} = T_{\text{min}\%50} + 2S_{\text{min}} = -0,6 + 2 * (-1,5) = \mathbf{-3,6^\circ\text{C}}$$

Antalya bölgesi için hesaplanan en düşük ve en yüksek kaplama sıcaklıkları frekans dağılım eğrisi Şekil 7.14’de verilmiştir.



Şekil 7.14. Kaplama sıcaklıklarına göre frekans dağılım eğrisi

Kanada SHRP formülüne göre hesaplama yapılırsa;

$$T_{\text{min}} = 0,859 * T_{\text{havamin}} + 1,17^\circ\text{C}$$

$$T_{\text{min}} = 0,859 * (-0,6) + 1,17 = \mathbf{0,6^\circ\text{C}} \quad (\%50 \text{ güvenirlilik})$$

$$T_{\text{min}\%98} = T_{\text{min}\%50} + 2S_{\text{min}} = 0,6 + 2 * (-1,5) = \mathbf{-2,4^\circ\text{C}} \quad (\%98 \text{ güvenirlilik})$$

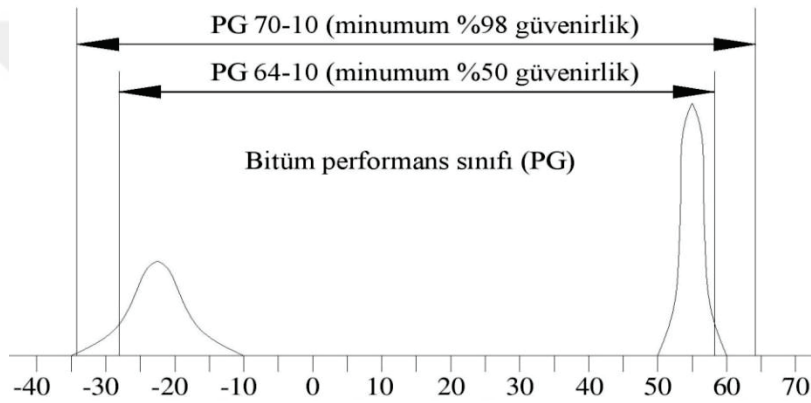
Hesaplanan tasarım sıcaklıklarının %50 ve %98 güvenirlilik değerleri için SHRP ve Kanada SHRP yöntemine göre sonuçları Çizelge 7.4’ de verilmiştir. Hesaplanan sıcaklıklara bakıldığında, en olumsuz olması nedeniyle çalışmada, SHRP yöntemi ile elde edilen sıcaklık değerleri esas alınmıştır.

Çizelge 7.4. SHRP ve Kanada SHRP yöntemine göre hesaplanan kaplama tasarım sıcaklıkları

Hesap Yöntemi	%50 Güvenirlilik				%98 Güvenirlilik			
	T _{havamaks}	T _{havamin}	T _{20mm}	T _{min}	T _{havamaks}	T _{havamin}	T _{20mm}	T _{min}
SHRP	39,6°C	-0,6°C	60,4°C	-0,6°C	45,2°C	-3,6°C	66,0°C	-3,6°C
Kanada SHRP	39,6°C	-0,6°C	-----	0,6°C	45,2°C	-3,6°C	-----	-2,4°C

7.5.5. Kaplama sıcaklıklarına göre bitüm seçilmesi

SHRP yöntemine göre Antalya için %50 güvenilirlikte hesaplanan kaplama yüksek sıcaklık değeri 60,4°C, düşük sıcaklık değeri -0,6°C'dir. Bu güvenilirlik değeri için seçilecek bitüm sınıfı PG 64-10 olacaktır. Aynı yöntemle %98 güvenilirlik derecesi için hesaplanan yüksek sıcaklık değeri 66°C, düşük sıcaklık değeri -3,6°C olduğundan uygulama bölgesi için bitüm sınıfı PG 70-10 olarak seçilmiştir. Antalya için seçilen bu bitüm sınıfının güvenilirlik derecesine göre sıcaklık dağılım grafiği Şekil 7.15 'de verilmiştir.



Şekil 7.15. Antalya ili için Superpave yöntemine göre bitüm seçimi

7.5.6. Trafik hızı ve sayısına göre bitüm seçilmesi

KGM 13 ncü Bölge Müdürlüğü sorumluluk sahasında bulunan Antalya ili için hesapta kullanılacak Yıllık Ortalama Günlük Trafik (YOGT) değerinin tespitinde Aksu-Serik arasındaki 145 nolu Sabit Trafik Sayım ve Sınıflandırma Cihazına ait veriler kullanılmıştır. Karayolları Genel Müdürlüğünden yazılı talep sonucu elde edilen 2015 yılı trafik verileri Çizelge 7.5' de verilmiştir.

Çizelge 7.5. YOGT değerleri

YOGT	Toplam Trafik	1.Yön (Yüksek)	Yön	2.Yön (Düşük)	Tarih	Yönsel Dağılım	K Faktörü	K Saat
36917	4356	2600	Doğu	1756	26.10. 2015	59,69	0,118	30
36917	3730	1882	Batı	1848	06.02. 2015	50,46	0,101	50
36917	3136	1672	Doğu	1464	31.03. 2015	53,32	0,085	100

2015 yılı için 36.917 olan YOGT değerinin; 28.019'u otomobil, 2533'ü orta yüklü ticari taşıt, 908'i otobüs, 4202'si kamyon, 1255'i Kamyon + Römork yada çekici trafiğidir.

Proje Saatlik Trafik; PST= YOGT * K olarak hesaplanmakta olup;

PST = 36 917 * 0,118 = 4356 ta/h olarak bulunur.

Taşıt cinslerine göre yıllık artış oranlarının hesaplanabilmesi için, Türkiye İstatistik Kurumu resmi internet sitesinden elde edilen 2006-2016 yıllarına ait motorlu kara taşıtları sayısı Çizelge 7.6' da verilmiştir.

Çizelge 7.6. Yıllara göre motorlu kara taşıtları sayısı (TÜİK, 2017)

Yıl	Toplam	Otomobil	Minibüs	Otobüs	Kamyonet	Kamyon	Traktör
2006	12 227 393	6 140 992	357 523	175 949	1 695 624	709 535	1 290 679
2007	13 022 945	6 472 156	372 601	189 128	1 890 459	729 202	1 327 334
2008	13 765 395	6 796 629	383 548	199 934	2 066 007	744 217	1 358 577
2009	14 316 700	7 093 964	384 053	201 033	2 204 951	727 302	1 368 032
2010	15 095 603	7 544 871	386 973	208 510	2 399 038	726 359	1 404 872
2011	16 089 528	8 113 111	389 435	219 906	2 611 104	728 458	1 466 208
2012	17 033 413	8 648 875	396 119	235 949	2 794 606	751 650	1 515 421
2013	17 939 447	9 283 923	421 848	219 885	2 933 050	755 950	1 565 817
2014	18 828 721	9 857 915	427 264	211 200	3 062 479	773 728	1 626 938
2015	19 994 472	10 589 337	449 213	217 056	3 255 299	804 319	1 695 152
2016	21 090 424	11 317 998	463 933	220 361	3 442 483	825 334	1 765 764

Not: Treyler cinsi araçlar kamyon sayısına dahil edilmiştir.

Her taşıt cinsi için ayrı ayrı olmak üzere, 2006-2016 yılları arasındaki taşıt sayısındaki artış yüzdeleri her yıl geçişi için hesaplanarak, aritmetik ortalamaları alınarak; otomobiller için yıllık trafik artış yüzdesi %5,6; otobüsler için %2,4; kamyon ve treyler için %1,5 olarak hesaplanmıştır.

$$t_t = t_0 * (1 + r)^t \quad (7.1)$$

$$t_p = 0,4343 \frac{(t_t - t_0)}{\log(\frac{t_t}{t_0})} \quad (7.2)$$

denklemleri kullanılarak Çizelge 7.7’de belirtilen ortalama günlük trafik ve 20 yıllık toplam trafik değerleri bulunur. Burada;

- t_p : 20 yıl sonrası için ortalama günlük trafik,
 t_0 : İlk yıl için günlük trafik,
 r : Trafik artış katsayısı,
 t_t : Son yıl için günlük trafik’tir.

Çizelge 7.7. 20 yıllık analiz süresi için yoldan geçecek trafik sayısı

Taşıt Grubu	İlk Trafik (Günlük)	Yıllık Artış (%)	Son Trafik (Günlük)	Ortalama Günlük Trafik (Proje Trafiği)	20 Yıllık Toplam Trafik
Kamyon	4202	1,5	5660	4894	35 726 200
Treyler	1255	1,5	1690	1462	10 672 600
Otobüs	908	2,4	1460	1163	8 489 900
Otomobil	30 552	5,6	90 850	55 330	403 909 000

Not: Orta yüklü ticari taşıt trafiği otomobil trafiğine ilave edilmiştir.

Hesap şeridindeki ortalama günlük standart dingil sayıları kamyon için aşağıda belirtildiği şekilde hesaplanabilir. Her taşıt için ortalama günlük trafik değerleri ve taşıt grubu göz önünde bulundurularak, Çizelge 7.8’ de verilen uygun taşıt eşdeğerlik faktörleri seçilir. Ortalama günlük trafik değerlerine göre, taşıt eşdeğerlik faktörleri kamyon için 2,18; treyler için 3,06; otobüs için 0,95 ve otomobil için 0,0006 olarak alınabilir.

Kamyon : (Yön Dağıtma Faktörü)*(Şerit Dağıtma Faktörü)*(Taşıt Eşdeğerlik Faktörü)*(Ortalama Günlük Trafik)

Çizelge 7.8. Taşıt eşdeğerlik faktörleri

Trafik Grubu	Trafik Kategorisi (Taşıt /Gün)				
	0-250	250-500	500-1500	1500-3000	>3000
Kamyon	1,74	1,83	1,96	2,04	2,18
Treyler	2,89	2,88	3,06	3,15	3,35
Otobüs	0,90	0,90	0,95	0,95	0,98
Otomobil	0,0006	0,0006	0,0006	0,0006	0,0006

Yol 2*2 şeritli devlet yolu, şerit dağıtma faktörü 0,90; yön dağıtma faktörü 0,5969 olarak alındığında;

$$\text{Kamyon: } 0,5969 * 0,90 * 2,18 * 4894 = 5732$$

$$\text{Treyler: } 0,5969 * 0,90 * 3,06 * 1462 = 2404$$

$$\text{Otobüs: } 0,5969 * 0,90 * 0,95 * 1163 = 594$$

$$\text{Otomobil: } 0,5969 * 0,90 * 0,0006 * 55,330 = 18$$

$$\text{Günlük toplam } W_g = 8748 \text{ standart dingil /gün}$$

$$T_{8,2} = 20 * 365 * 8748 = \mathbf{63.860.400 \text{ standart dingil /20 yıl}}$$

Hesaplanan 63.860.400 eşdeğer tek dingil yükü tekerrür sayısına göre sıkıştırma parametreleri; $N_{ini}=9$, $N_{des}=139$ ve $N_{maks}=228$ olarak alınmıştır.

7.6. Agrega Seçimi

Çalışmada agregası olarak, Eskişehir çevresindeki ESFALT taş ocağından temin edilen kireçtaşı cinsi agregası kullanılmıştır. Maksimum tane boyutu 19 mm, nominal maksimum tane boyutu 12,5 mm olan superpave agregası gradasyonu seçilmiştir. Karışımlarda kullanılan kireçtaşı agregasının elek analizi deney sonuçları Çizelge 7.9' da verilmiştir.

Çizelge 7.9. Agrega elek analizi deney sonuçları

Agregası	Elek (mm)	Elek Üstünde Kalan (%)	Toplam (%)
Kaba Agregası	12,5	6	51
Kaba Agregası	9,50	14	
Kaba Agregası	4,75	31	
İnce Agregası	2,36	15	43,5
İnce Agregası	2,00	3	
İnce Agregası	1,18	7	
İnce Agregası	0,600	6	
İnce Agregası	0,425	2	
İnce Agregası	0,300	2	
İnce Agregası	0,180	3	
İnce Agregası	0,150	1	
İnce Agregası	0,075	4,5	
Filler		5,5	5,5
	Toplam	100	

7.7. Modifiye Bitüm Numunelerinin Hazırlanması

Türkiyede bor kullanımına yönelik olarak; Arslan vd. (2011) ve Arslan vd. (2012) tarafından yapılan çalışmalarda, laboratuvar ortamında kimyasal olarak sentezlenen trietilen glikol esaslı poliboron (TEGPB)'un 50/70 penetrasyon bitüme %1, 2, 3 ve 5; organik esaslı borik asit bileşiğinin (OBBAC) ise %1, 2, 3, 5 ve 10 oranlarında ilave edildiği görülmektedir.

Arslan (2010) tarafından magnezyum kullanılarak yapılan bir çalışmada ise, organik esaslı magnezyum bileşiği bitüme ağırlıkça %1, 2, 3, 5 ve 10 oranlarında eklenerek bitüm modifiye edilmiştir.

Tez çalışması kapsamında, literatürde kullanıldığı görülen katkı oranlarına benzer olarak, bitüm ağırlığınca %1, 3, 5 ve 8 katkı oranlarında modifiye bitüm numuneleri hazırlanmıştır. TÜPRAŞ rafinerisine ait 50/70 penetrasyonlu bitüm kullanılmıştır. Modifiye bitüm 50 g'lık gruplar halinde hazırlanmış, karıştırma işlemi 150°C sıcaklıkta 30 dakika süresince yapılmıştır. Modifiye işlemi için 1500 rpm kapasiteli karıştırıcı kullanılmıştır.

7.8. Çokdeğişkenli İstatistiksel Yöntemler

Çalışma kapsamında normal ve modifiye bitüm numuneleri üzerinde 90-160°C sıcaklık aralığında gerçekleştirilen dönel viskozimetre deney sonuçları ile Marshall yöntemine uygun olarak hazırlanan BSK numunelerinin deney sonuçları Çokdeğişkenli İstatistiksel Yöntemler kullanılarak modellenmiştir.

Çokdeğişkenli (multivariate) istatistiksel analiz, incelenen olay ve çevresindeki çok sayıda içsel ve dışsal faktörleri dikkate alarak, problemi doğasındaki yapısına ilişkin bilgilere göre (gerçek oluşumuna göre) incelemek ve çözümlere ulaşmak için geliştirilmiş yöntemler bütünüdür. Bu çalışma kapsamında yararlanılan İstatistiksel yöntemlerin bazıları aşağıda kısaca açıklanmıştır.

- Hotelling T^2 testi:

Çokdeğişkenli normal dağılım varsayımına göre iki ve daha çok değişkenli ($p \geq 2$) tek örnek ve iki örnek hipotezlerinin test edilmesinde yararlanılan bir yöntemdir. $p \geq 2$ çokdeğişkenli normal dağılım varsayımına göre tek populasyon ya da iki populasyon parametrelerine dayalı hipotezlerin test edilmesinde yararlanılan, tek örnek ve iki örnek veri matrislerine dayalı olarak karar vermeyi amaçlayan bir yöntemdir (Özdamar, 2018).

- Çokdeğişkenli varyans analizi: (MANOVA, Multivariate analysis of variance)

İki ve daha fazla değişkenli ($p \geq 2$) normal dağılım gösteren $k \geq 2$ popülasyona göre kurulmuş hipotezlerin test edilmesinde yararlanılan bir yöntemdir. Tek yönlü ve iki yönlü deneme sonuçları ile çokdeğişkenli ve çok faktörlü deneme sonuçlarının analizinde yararlanılan bir yöntemdir (Özdamar, 2018).

Bağımlı ve bağımsız çokdeğişkenli iki toplum parametre vektörlerine dayalı hipotezleri test etmekte kullanılan Hotelling T^2 testi, grup sayısı ikiden fazla olduğunda, çalışmadığından analizler MANOVA ile yapılmaktadır. MANOVA, Hotelling T^2 testinin işlevlerini de yapan bir yöntemdir.

MANOVA üç farklı biçimde kurulan hipotezleri test eder. MANOVA test edilen hipotez tipine göre farklı isimlerle anılır. Bunlar aşağıdaki gibi açıklanabilir:

- İki ve daha fazla bağımsız grupta çokdeğişkenli normal dağılım gösteren popülasyonlara ilişkin kurulan hipotezlerin test edilmesinde Tek Yönlü Çokdeğişkenli Varyans Analizi (TYMANOVA) kullanılır.

- İki ve daha fazla bağımlı grupta çokdeğişkenli normal dağılım gösteren popülasyonlara ilişkin kurulan hipotezlerin test edilmesinde İki Yönlü Çokdeğişkenli Varyans Analizi (IYMANOVA) kullanılır.

- İki ve daha fazla bağımlı ya da bağımsız çokdeğişkenli çok faktörlü denemelerin sonuçlarının analizinde Faktöriyel MANOVA (FMANOVA) yöntemi kullanılır.

- Çokdeğişkenli regresyon analizi: (Multivariate Regression Analysis)

İki bağımlı ve bir ya da daha fazla bağımsız değişken arasındaki sebep-sonuç ilişkilerini ortaya koymak amacıyla yararlanılan bir yöntemdir. Çokdeğişkenli normal dağılım gösteren populasyonlardan çekilmiş örneklerde bağımlı değişkenler ile bağımsız değişken/değişkenler seti arasındaki matematiksel bağıntıları ve ilişkileri ortaya koymak amacıyla yararlanılan bir yöntemdir (Özdamar, 2018).



8. BULGULAR VE TARTIŞMA

8.1. Bitüm Deneyleri

Normal ve modifiye bitümlere aşağıda belirtilen deneyler uygulanmış ve modifikasyonun bitüm performansında meydana getirdiği değişimler incelenmiştir.

- Geleneksel bitüm deneyleri (Yumuşama noktası, Penetrasyon, Özgül ağırlık vb.),
- Viskozite deneyleri,
- Dönel ince film etüvü (RTFOT) ve kütle kaybı deneyi,
- Basınçlı yaşlandırma kabı (PAV),
- Dinamik kesme reometresi (DSR),
- Kiriş eğme reometresi (BBR)

8.1.1. Geleneksel bitüm deneyleri

Çalışmalarda kullanılan 50/70 penetrasyonlu normal bitüm özgül ağırlık, penetrasyon, yumuşama ve parlama noktası deney sonuçları Çizelge 8.1’ de verilmiştir.

Çizelge 8.1. Normal bitüm fiziksel özellikleri

Özellikler	Deney Standardı	B 50/70	
		Deney Sonucu	Şartname Sınırı
Özgül Ağırlık (g/cm ³), 25°C	TS EN 15326	1,026	1,0-1,1
Penetrasyon (0,1 mm), 100 g. 5 s 25°C	TS EN 1426	63,1	50-70
Yumuşama Noktası (°C)	TS EN 1427	46,9	46-54
Parlama Noktası (°C)	TS EN ISO 2592	286	≥ 230

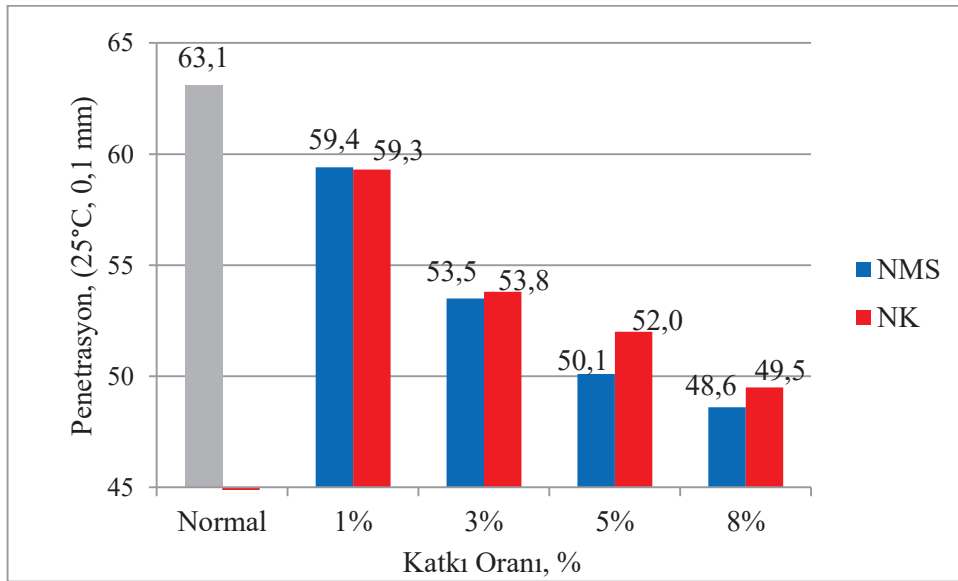
Normal bitüm, nano mg spinel oksit (NMS) ve nano kolemanit (NK) ile modifiye edilen bitüm numuneleri üzerinde penetrasyon ve yumuşama noktası deneyleri gerçekleştirilmiş olup, sonuçları Çizelge 8.2’ de verilmiştir.

Çizelge 8.2. Normal, NMS ve NK modifiye bitüm numuneleri penetrasyon ve yumuşama noktası deney sonuçları

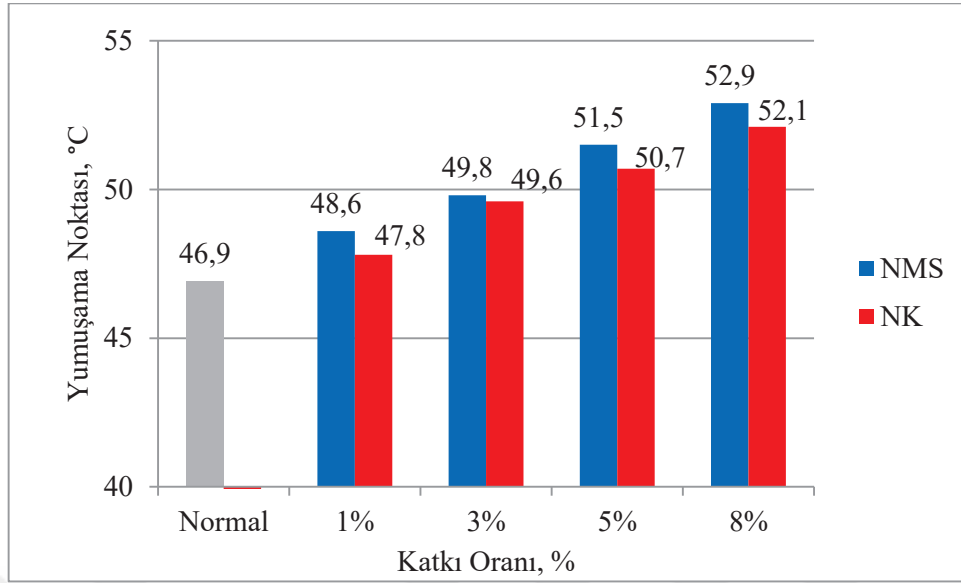
Numune katkı tipi / oranı	PENETRASYON DENEYİ		YUMUŞAMA NOKTASI DENEYİ	
	Sonuç (25 °C 0,1 mm)	Normal bitüme göre değişim (%)	Sonuç (°C)	Normal bitüme göre değişim (%)
Normal	63,1		46,9	
NMS1	59,4	% 5,9 Azalma	48,6	%3,6 Artış
NMS3	53,5	%15,2 Azalma	49,8	%6,2 Artış
NMS5	50,1	%20,6 Azalma	51,5	%9,8 Artış
NMS8	48,6	%23,0 Azalma	52,9	%12,8 Artış
NK1	59,3	%6,0 Azalma	47,8	%1,9 Artış
NK3	53,8	%14,7 Azalma	49,6	%5,8 Artış
NK5	52,0	%17,6 Azalma	50,7	% 8,1 Artış
NK8	49,5	%21,5 Azalma	52,1	%11,1 Artış

Yumuşama noktası ve penetrasyon deney sonuçlarına göre; her iki katkı için %8 nano katkı oranında bitümün yumuşama noktası yaklaşık 5-6 °C artmakta, penetrasyon değerleri %8 NMS ve NK modifiye bitüm numunelerinde sırasıyla %23 ve %21 azalmaktadır.

NMS ve NK ile modifiye numunelerde katkı oranlarına göre bitüm penetrasyon değerlerindeki değişim Şekil 8.1’ de, yumuşama noktasındaki değişim ise Şekil 8.2’de verilmiştir.



Şekil 8.1. Katkı tip ve oranlarına göre penetrasyon deney sonuçları



Şekil 8.2. Katkı tip ve oranlarına göre yumuşama noktası deney sonuçları

8.1.2. Viskozite deneyleri

Normal, NMS ve NK modifiye bitüm numuneleri üzerinde 90-160 °C sıcaklık aralığında her 10°C sıcaklık değişiminde ölçüm yapılmak suretiyle Gazi Üniversitesi Kimya Mühendisliği Bölümü laboratuvarlarında mevcut Brookfield viskozite cihazı ile deneyler gerçekleştirilmiştir.

8.1.2.1. Normal bitüm viskozite deney sonuçları

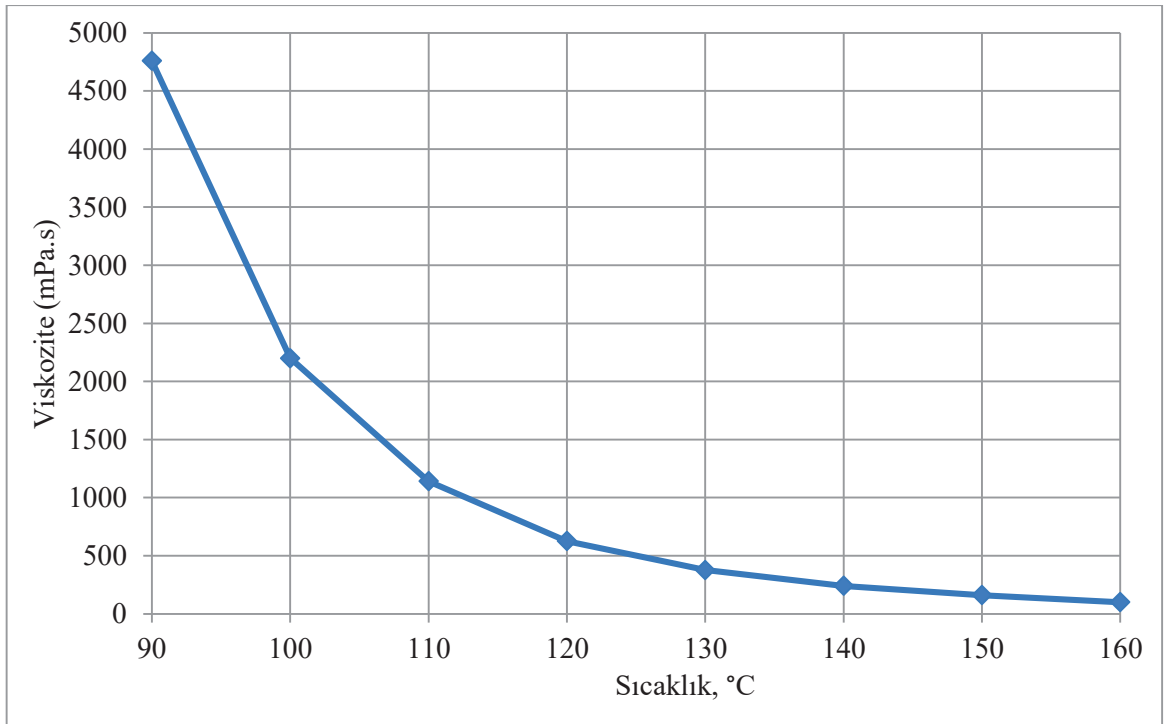
Deney standartlarında cihazın mili 20 dev / dak hızla döndürülür ve mil döndükçe ölçülen tork değerleri viskoziteye dönüştürülür. Ancak çalışma kapsamında kontrol bitüm için her sıcaklıkta 20, 50, 100 ve 150 dev/dak dönüş hızlarında ayrı ayrı ölçümler yapılmıştır. Bunun nedeni özellikle yüksek sıcaklıklarda (150-160°C), 20 dev/dak hız ile hassas ölçümler yapılamamasıdır. Örneğin; 160°C sıcaklıkta gerçek viskozite değerimizin 113 mPa.s olduğunu varsayalım. 150 dev/dak dönüş hızı seçilerek söz konusu viskozite değerini birebir okumak mümkün iken, 20 dev/dak dönüş hızında cihazda 100 mPa.s değeri okunmaktadır. Bu durum yüksek sıcaklıklarda %10-20 mertebesinde gerçek viskozite değerinden farklı okuma yapılması anlamına gelmektedir ki, esas olarak tespit edilmek istenen viskozitedeki değişimin okunamaması anlamına gelmektedir. Bu nedenle, çalışma kapsamında her sıcaklık için 150 dev/dak'da viskozite değerleri tespit edilmiş ve sonrasında ölçülen üç değerın ortalamasını alınmıştır.

Deney esnasında kararlı sıcaklık değerine ulaşıldıktan sonra 1 dakika aralıklarla viskozite değerleri okunmakta, bu şekilde okunan 3 viskozite değeri kayıt altına alınmaktadır. 3 viskozite değerinin ortalamasının o sıcaklıktaki viskozite değerini verdiği kabul edilmektedir. Çalışmalarda kullanılan 50/70 penetrasyon bitümün farklı dönüş hızları için 90-160°C sıcaklık aralığındaki viskozite değerleri Çizelge 8.3’ de verilmiştir.

Çizelge 8.3. Farklı dönüş hızları için normal bitüm viskozite değerleri

Sıcaklık (°C)	Viskozite (mPa.s)			
	20 rpm	50 rpm	100 rpm	150 rpm
90	4850	4810	4864	4760
100	2225	2220	2216	2200
110	1150	1140	1140	1140
120	625	630	630	626
130	375	380	380	376
140	250	240	243	240
150	150	160	160	160
160	100	100	100	100

Dönel viskozimetre deneyleri neticesinde normal bitüm viskozitesinin sıcaklıkla değişimini gösteren grafik Şekil 8.3’ de verilmiştir.



Şekil 8.3. Normal bitüm sıcaklık – viskozite değişimi (150 dev/dak)

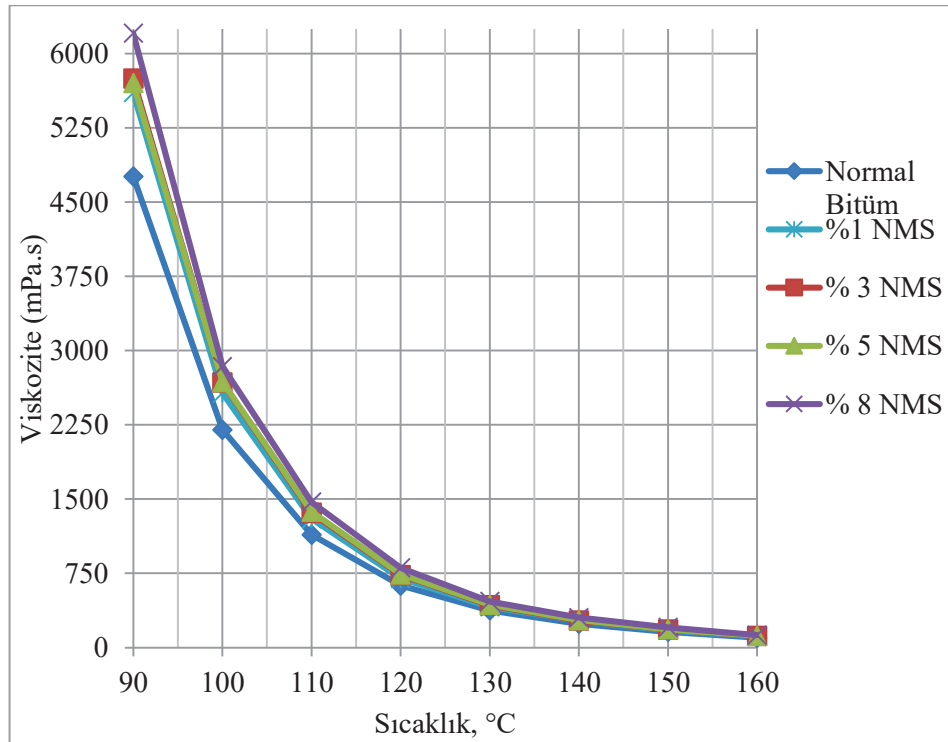
8.1.2.2. NMS modifiye bitüm viskozite deney sonuçları

Normal bitümün bitüm ağırlığınca %1, 3, 5 ve 8 katkı oranlarında NMS ile modifiyesi neticesinde 90-160°C sıcaklık aralığında viskozitedeki değişim Çizelge 8.4' de verilmiştir.

Çizelge 8.4. NMS modifiye bitüm için katkı oranlarına göre sıcaklık-viskozite değişimi

Sıcaklık (°C)	Normal bitüm viskozite	NMS modifiye bitüm viskozite değeri (mPa.s)			
	(mPa.s)	1%	3%	5%	8%
90	4760	5605	5747	5702	6205
100	2200	2570	2677	2682	2840
110	1140	1302	1362	1373	1472
120	626	697	733	740	805
130	376	412	427	432	467
140	240	272	273	277	303
150	160	176	183	185	205
160	100	113	117	119	125

Normal bitümün NMS ile modifiyesi neticesinde viskozite – sıcaklık değişim grafiği Şekil 8.4' de verilmiştir.



Şekil 8.4. NMS modifiye bitüm için katkı oranlarına göre sıcaklık-viskozite değişimi

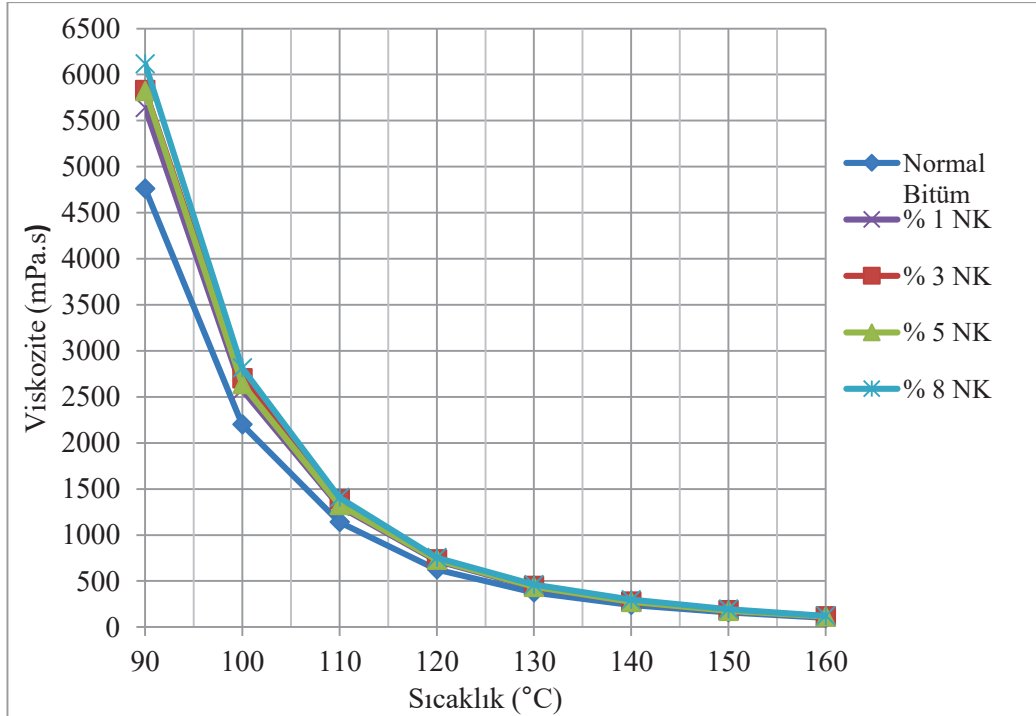
8.1.2.3. NK modifiye bitüm viskozite deney sonuçları

Normal bitümün bitüm ağırlığınca %1, 3, 5 ve 8 katkı oranlarında NK ile modifiyesi neticesinde 90-160°C sıcaklık aralığında viskozitedeki değişim Çizelge 8.5' de verilmiştir.

Çizelge 8.5. NK modifiye bitüm için katkı oranlarına göre sıcaklık-viskozite değişimi

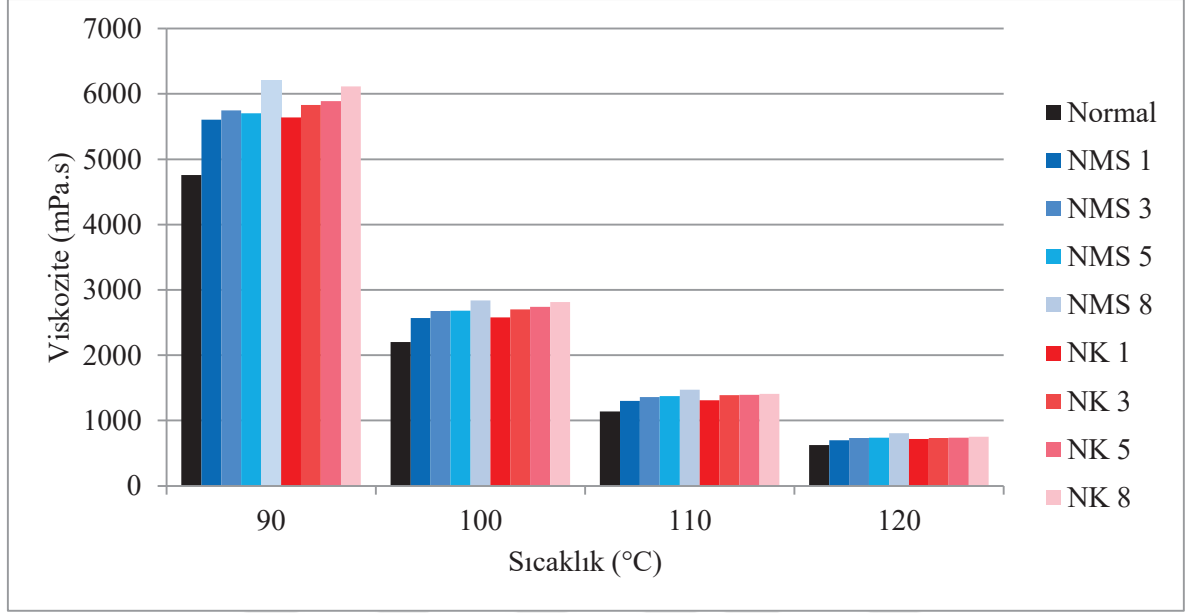
Sıcaklık (°C)	Normal Bitüm Viskozite (mPa.s)	NK Modifiye Bitüm Viskozite Değeri (mPa.s)			
		1%	3%	5%	8%
90	4760	5640	5831	5891	6115
100	2200	2579	2702	2740	2814
110	1140	1311	1389	1392	1407
120	626	718	735	740	755
130	376	431	446	454	460
140	240	269	275	280	297
150	160	177	181	183	194
160	100	110	116	118	122

Normal bitümün NK ile modifiyesi neticesinde viskozite – sıcaklık değişim grafiği Şekil 8.5' de verilmiştir.



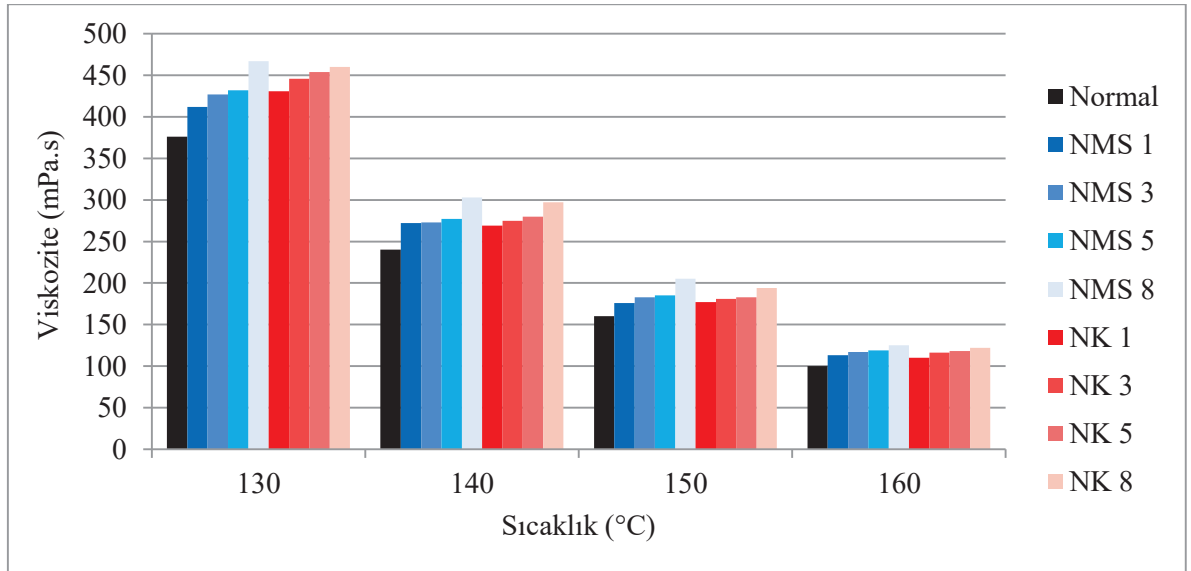
Şekil 8.5. NK modifiye bitüm için katkı oranlarına göre sıcaklık-viskozite değişimi

Normal, NMS ve NK modifiye numunelerde 90-120°C sıcaklık aralığında viskozite değerlerinin değişimi Şekil 8.6, 130-160°C sıcaklık aralığında viskozite değerlerinin değişimi ise Şekil 8.7’de verilmiştir.



Şekil 8.6. Normal, NMS ve NK katkıli numunelerde 90-120°C sıcaklık aralığında viskozite değerleri

Sıcak yaz dönemlerinde asfalt beton kaplama üzerinde oluşabilecek 90°C sıcaklık için; %8 NMS ve NK modifiye bitüm numuneleri viskozite değerlerinde normal bitüme kıyasla sırasıyla yaklaşık %30 ve %28 artış olmaktadır.



Şekil 8.7. Normal, NMS ve NK katkıli numunelerde 130-160°C sıcaklık aralığında viskozite değerleri

Modifiye bitümlerin plentte karışım sıcaklığına yakın olan 160°C için; %8 NMS ve NK modifiye bitüm numuneleri viskozite değerlerinde normal bitüme kıyasla sırasıyla yaklaşık %25 ve %22 artış olmaktadır. Kullanılan nano modifiye malzemeleri olan NMS ve NK bitüm performansını arttırmaktadır.

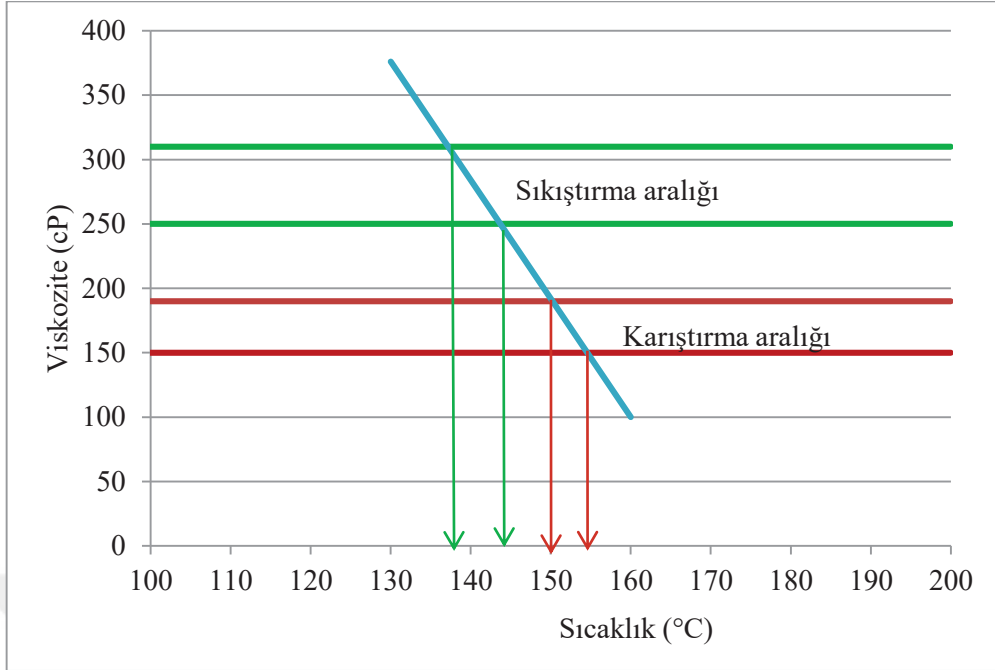
8.1.2.4. Normal ve modifiye bitüm karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları

Normal, NMS ve NK modifiye bitüm numuneleri üzerinde 135 ve 165°C sıcaklıkta dönel viskozimetre deneyleri gerçekleştirilmiştir. Viskozite değerleri her sıcaklıkta 150 rpm değerinde ölçülen üç değerın ortalamasını ifade etmektedir. Deney sonuçları Çizelge 8.6’ da verilmiştir.

Çizelge 8.6. 135 ve 165°C viskozite deney sonuçları

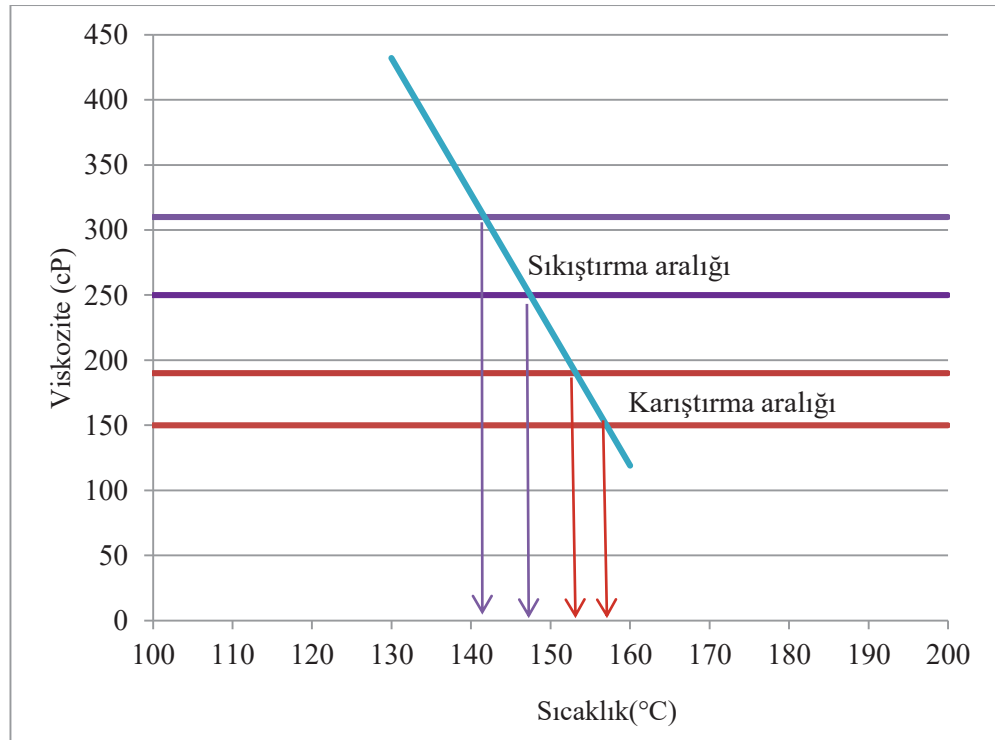
Bitüm Tipi	Viskozite, cP	
	135° C	165° C
Normal	312	79
NMS1	350	86
NMS3	358	88
NMS5	361	90
NMS8	392	95
NK1	352	84
NK3	356	85
NK5	364	90
NK8	380	93

Normal, NMS ve NK modifiye bitüm numuneleri için çizilen viskozite-sıcaklık grafiklerinde, karıştırma için 170 ± 20 cP, sıkıştırma için 280 ± 30 cP viskozluk olacak şekilde bitümün karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları belirlenmiştir. Normal bitüm için karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarının tayin edildiği viskozite-sıcaklık grafiği Şekil 8.8’de verilmiştir.

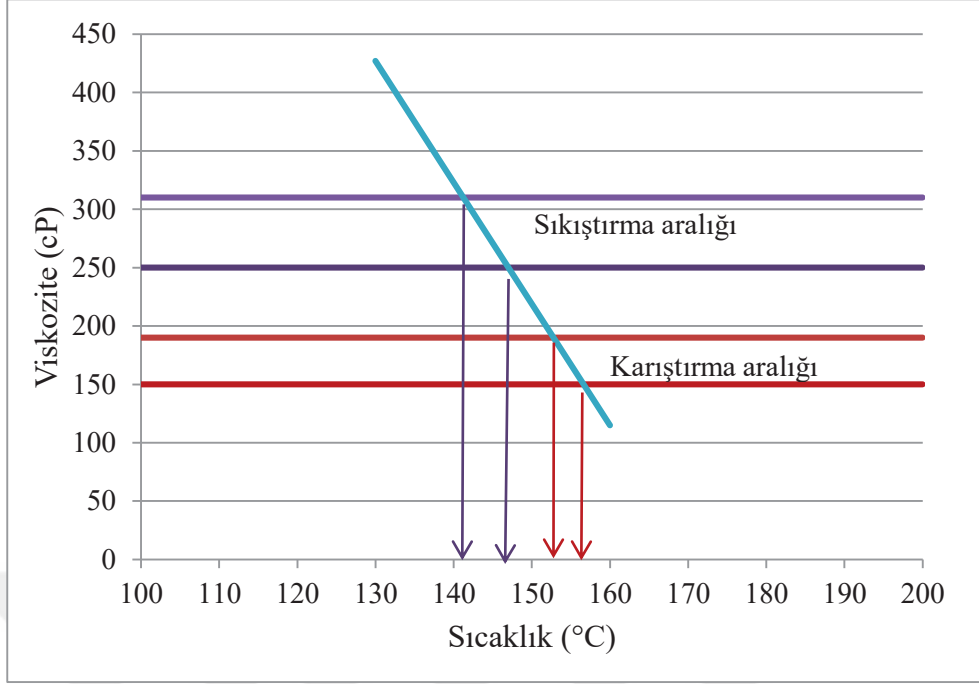


Şekil 8.8. Normal bitüm karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları

%5 katkı oranındaki NMS ve NK modifiye bitüm numuneleri için de karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları aynı şekilde belirlenerek sırasıyla Şekil 8.9 ve Şekil 8.10'da verilmiştir.



Şekil 8.9. 5 NMS modifiye bitüm karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları



Şekil 8.10. 5 NK modifiye bitüm karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları

Karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları toplu olarak Çizelge 8.7’ de verilmiştir. Her iki katkı ile yapılan modifiye neticesinde; optimum katkı oranında numunelerin sıkıştırma sıcaklığı yaklaşık 4,5-5,0 °C, karıştırma sıcaklığı ise 2,5-3,0 °C artmaktadır.

Çizelge 8.7. Normal, NMS ve NK modifiye numuneleri sıkıştırma ve karıştırma sıcaklıkları

Numune	Sıkıştırma sıcaklığı (°C)	Karıştırma Sıcaklığı (°C)
Normal	135,3 – 143,0	150,7 – 155,9
5 NMS	140,6 – 147,3	153,9 – 158,4
5 NK	140,9 - 147,5	154,1– 158,4

8.1.3. Dönel ince film etüvü (RTFOT) ve kütle kaybı deneyi

8.1.3.1. Dönel ince film etüvü (RTFOT) deneyi

Normal ve modifiye bitüm ayrı ayrı ısıtılarak, 8 adet şişenin her birinin içerisine 0,001 gram hassasiyetle tartılmış $35 \pm 0,5$ gram bitüm doldurularak, 163°C ’de ısıtılmış RTFOT etüvünün içerisine yerleştirilmiş ve dönen tabla dakikada 15 devir yapacak şekilde 85 dakika süreyle döndürülerek deney yapılmıştır.

8.1.3.2. Kütle kaybı deneyi

Normal, NMS ve NK modifiye bitümlerin RTFOT deneyi sonrası kütle kayıpları Çizelge 8.8’ de verilmiş olup, bitüm numunelerinin yaşlanma sonrası kütle kayıplarının şartnamenin öngördüğü sınırın altında kaldığı görülmektedir.

Çizelge 8.8. Normal, NMS ve NK modifiye bitüm numuneleri için kütle kaybı deney sonuçları

Numune Tipi	RTFOT öncesi		RTFOT sonrası		Kütle kaybı, %	Ort, %	PG 58-28 ila PG 70-28 arası bitüm sınıfları için EN 12607-1'e göre sınır maksimum % 1'dir,
	Boş Ağırlığı (g)	Şişe Bitüm Ağırlığı (g)	Şişe + Bitüm Ağırlığı, (g)				
Normal (1)	210,02	35,06	245,00	0,23	0,27		
Normal (2)	208,60	35,26	243,75	0,31			
1 NMS (1)	207,90	34,95	242,70	0,43	0,43		
1 NMS (2)	210,04	35,30	245,19	0,42			
3 NMS (1)	209,97	35,20	245,05	0,34	0,44		
3 NMS (2)	212,10	35,47	247,38	0,54			
5 NMS (1)	208,50	35,22	243,55	0,48	0,47		
5 NMS (2)	211,14	35,00	245,98	0,46			
8 NMS (1)	213,03	35,05	247,86	0,63	0,67		
8 NMS (2)	211,38	35,20	246,33	0,71			
1 NK (1)	210,61	35,44	245,91	0,39	0,37		
1 NK (2)	210,74	35,39	246,01	0,34			
3 NK (1)	211,90	35,07	246,80	0,48	0,45		
3 NK (2)	209,19	35,46	244,50	0,42			
5 NK (1)	207,10	35,28	242,14	0,68	0,72		
5 NK (2)	209,11	34,59	243,44	0,75			
8 NK (1)	210,50	34,97	245,20	0,77	0,83		
8 NK (2)	209,33	35,05	244,07	0,88			

8.1.4. Dinamik kesme reometresi (DSR) deneyi

Çalışma kapsamında ilk aşamada, bitümün yüksek sıcaklık özelliklerinin tespiti için yaşlandırılmamış bitüm numuneleri üzerinde DSR deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu maksatla normal bitüm ile NMS ve NK modifiye bitüm numuneleri üzerinde 64 ve 70°C gibi iki farklı deney sıcaklığında çalışılmıştır.

Söz konusu sıcaklıklarda, normal ve modifiye bitümlerin kompleks kayma modülü (G^*) ve faz açısı (δ) belirlenerek, “ $G^*/\sin\delta$ ” tekerlek izi direnç parametreleri belirlenmiş ve şartname kriterleri ile kıyaslanmıştır. Yaşlandırılmamış numuneler için 1000 mikron (1mm) kalınlık ve 25 mm çaplı plaka kullanılmıştır.

İkinci aşamada, normal ve modifiye bitüm numuneleri önce RTFOT ile kısa dönem, sonrasında PAV cihazı ile uzun dönem yaşlanmaya maruz bırakılarak DSR deneyleri gerçekleştirilmiştir. Benzer şekilde, normal ve modifiye bitümlerin kompleks kayma modülü ve faz açısı belirlenerek, “ $G^* \cdot \sin\delta$ ” orta dereceli sıcaklık rijitliği tespit edilmiştir. Yaşlandırılmış numuneler için 2000 mikron (2 mm) kalınlık ve 8 mm çaplı plaka kullanılmıştır.

8.1.4.1. Yaşlandırılmamış bitüm DSR deney sonuçları

Yaşlandırılmamış modifiye numunelere DSR deneyleri yapılarak modifiye bitümlerin tekerlek izi dayanımlarının normal bitüm ile kıyaslanması amaçlanmıştır.

Plakaya yerleştirilen ve teste hazır olan numune, su banyosu yardımıyla $0,1^\circ\text{C}$ hassasiyetle deney sıcaklığına getirilerek, ısı dengesinin sağlanması için 10 dakika bekletilmiş ve bu süre sonunda bitüm şartnamesine göre salınım hızı 10 rad/s frekansta, yaşlandırılmamış numuneler için 120 Pa, yaşlandırılmış numuneler için 220 Pa gerilme uygulanarak 10 devirlik bir ön koşullandırma yapılmıştır.

Normal ve modifiye bitüm ASTM D7175’ de belirtildiği üzere 135°C de ısıtılarak numuneler istenilen ebatlarda kalıp kullanılmadan dökülmüş, bir saatlik bekleme süresi sonunda uygun ebatlı olduğu değerlendirilen numuneler seçilerek teste tabi tutulmuştur. Normal ve NMS modifiye bitüm numuneleri için G^* ve δ değerleri Çizelge 8.9’ da verilmiştir.

Çizelge 8.9. Yaşlandırılmamış normal ve NMS modifiye numuneler için G^* ve δ değerleri

Bitüm Türü	Deney Sıcaklığı (64°C)		Deney Sıcaklığı (70°C)	
	G^*	δ	G^*	δ
	(kPa)	(°)	(kPa)	(°)
Normal	1,158	88,35	0,524	88,89
1 NMS	1,449	87,90	0,653	88,57
3 NMS	1,531	87,65	0,679	88,13
5 NMS	1,568	87,78	0,725	88,47
8 NMS	1,957	87,53	0,876	88,31

Yaşlandırılmamış normal ve NK modifiye bitüm numuneleri için G^* ve δ değerleri Çizelge 8.10’da verilmiştir.

Çizelge 8.10. Yaşlandırılmamış normal ve NK modifiye numuneler için G^* ve δ değerleri

Bitüm Türü	Deney Sıcaklığı (64°C)		Deney Sıcaklığı (70°C)	
	G^*	δ	G^*	δ
	(kPa)	(°)	(kPa)	(°)
Normal	1,158	88,35	0,524	88,89
1 NK	1,430	88,04	0,658	88,68
3 NK	1,620	87,70	0,747	88,43
5 NK	1,683	87,90	0,772	88,62
8 NK	1,850	87,87	0,853	88,59

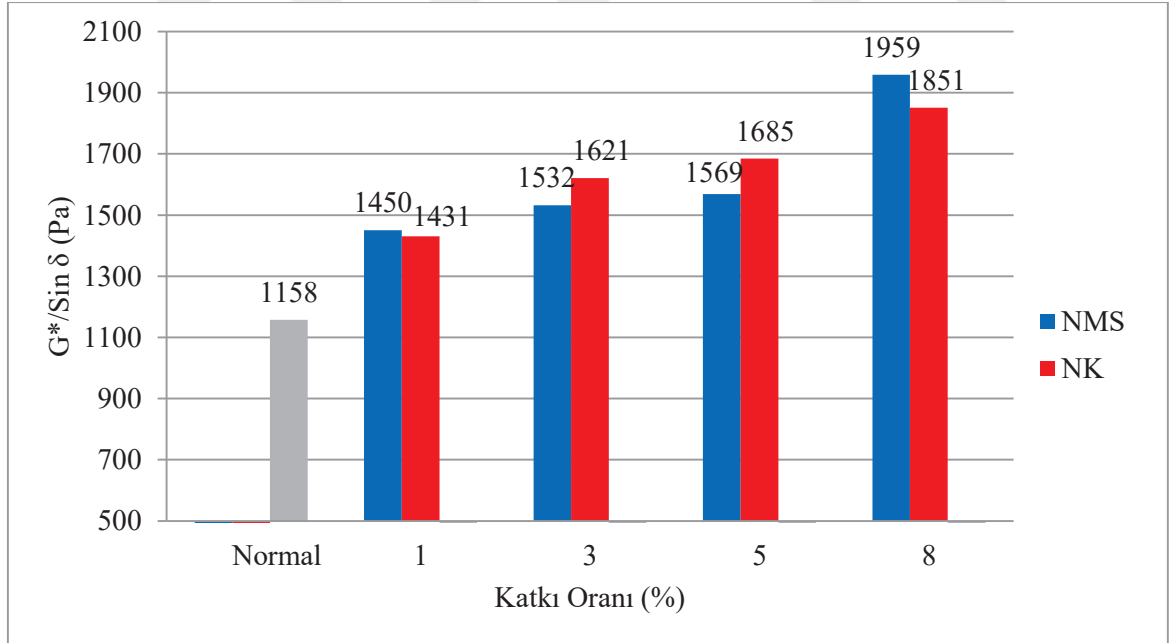
Yaşlandırılmamış normal, NMS ve NK modifiye bitüm numuneleri üzerinde yapılan DSR deneyleri sonucunda elde edilen $G^*/\sin\delta$ değerleri ile yenilme sıcaklıkları Çizelge 8.11’de verilmiş olup, %8 NMS katkı oranı için yenilme sıcaklığı artışı normal bitüme kıyasla yaklaşık 4°C’dir. NMS katkı oranı arttıkça yenilme sıcaklığı artmaktadır. %8 NK katkı oranında normal bitüme göre yenilme sıcaklığında 3,7°C artış olmaktadır. NK katkı oranı arttıkça yenilme sıcaklığı artmaktadır.

NMS ve NK modifiye bitüm numunelerinde faz açısı (δ) normal bitüm numunelerine göre daha düşüktür. Bu durum bitümün modifiye edilmesi ile viskozitesinin arttığını göstermektedir.

Çizelge 8.11. Katkı tipleri ve oranlarına göre 64°C sıcaklıkta $G^*/\sin \delta$ değerleri ile yenilme sıcaklıkları

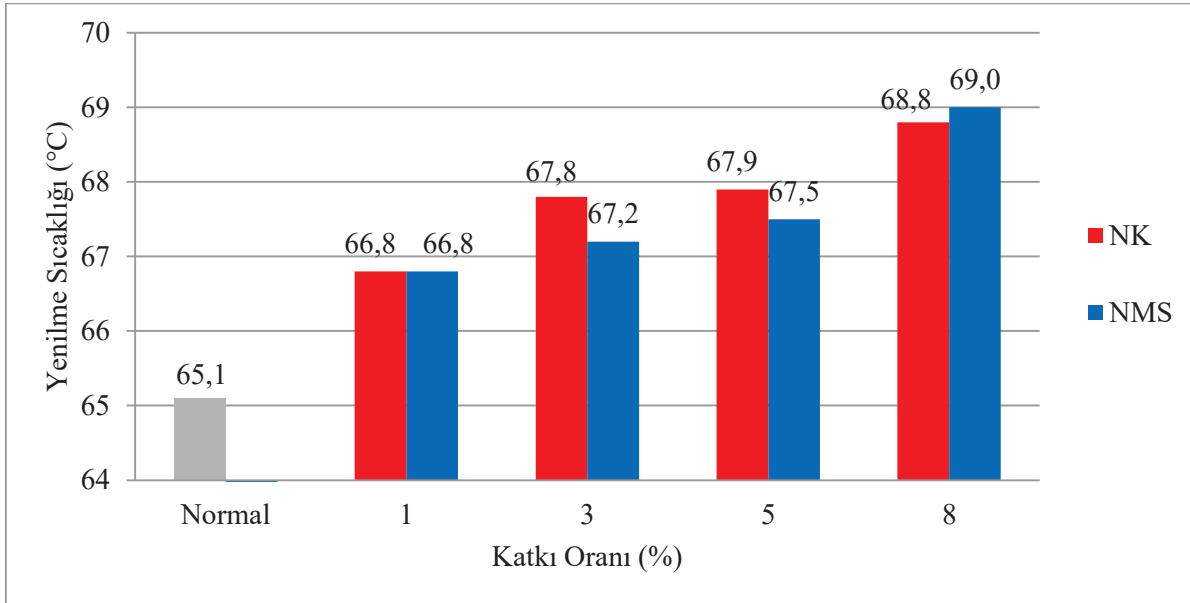
Bitüm Tipi	Yenilme Sıcaklığı	$G^*/\sin \delta$ - 64°C
	(°C)	(kPa)
Normal bitüm	65,1	1,158
1 NMS	66,8	1,450
3 NMS	67,2	1,532
5 NMS	67,5	1,569
8 NMS	69,0	1,959
1 NK	66,8	1,431
3 NK	67,8	1,621
5 NK	67,9	1,685
8 NK	68,8	1,851

Yaşlandırılmamış numuneler üzerinde gerçekleştirilen DSR deney sonuçlarına göre; %8 NMS ve NK modifiye bitüm numunelerinde, 64 °C sıcaklıkta tekerlek izi direnç parametresi olan $G^*/\sin \delta$ değerinde normal bitüme kıyasla sırasıyla %69 ve %60 artış olmaktadır.



Şekil 8.11. Yaşlandırılmamış normal, NMS ve NK modifiye numunelerde 64 °C sıcaklık için $G^*/\sin \delta$ değerleri

Yaşlandırılmamış normal ve modifiye bitüm numuneleri için, DSR deneyi yenilme sıcaklıkları Şekil 8.12’de gösterilmiştir.



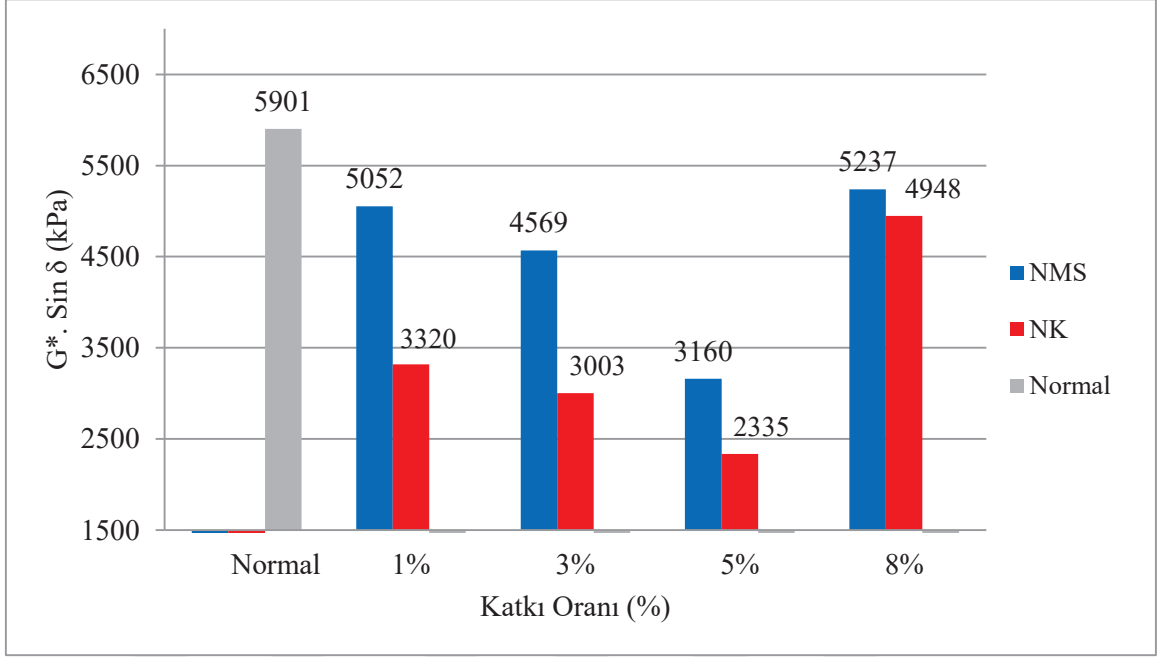
Şekil 8.12. Yaşlandırılmamış normal, NMS ve NK katkıli numunelerde DSR deneyi yenilme sıcaklıkları

8.1.4.2. Yaşlandırılmış bitüm DSR deney sonuçları

RTFOT ve sonrasında PAV cihazı ile yaşlandırılan normal, NMS ve NK modifiye bitüm numunelerine ait $G^* \cdot \sin \delta$ değerlerinin katkı oranı ile değişimi Şekil 8.13’de verilmiştir.

DSR deney sonuçlarına göre 25°C sıcaklıkta %5 NMS ve NK ile modifiye edilen numunelerde $G^* \cdot \sin \delta$ yorulma direnç parametresindeki azalma sırasıyla %46 ve %60’dır.

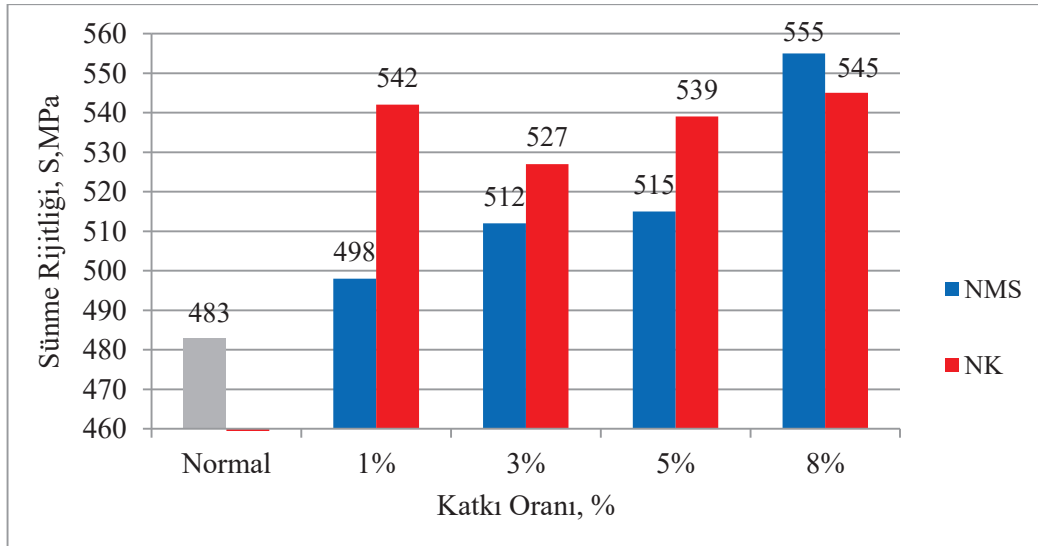
Yorulma çatlağı direnci açısından, $G^* \cdot \sin \delta$ değerlerinin daha düşük olması arzu edilir. RTFOT ve sonrasında PAV ile yaşlandırılmış bitüm numunelerinin 25°C sıcaklıktaki deney sonuçları değerlendirildiğinde; normal bitüm için $G^* \cdot \sin \delta$ değerinin şartname sınırı olan 5000 kPa’dan büyük olduğu görülmektedir. Katkı kullanımı ile orta dereceli sıcaklıklarda $G^* \cdot \sin \delta$ değerinin azalmaya başladığı, normal bitüme göre modifiye bitüm numunelerinin yorulma çatlağı direncinin artmaya başladığı görülmektedir. Bu durumun modifiye bitüm numunelerinin normal bitüme göre daha az yaşlanmasından kaynaklandığı şeklinde değerlendirilebilir.



Şekil 8.13. Normal, NMS ve NK modifiye numunelerde 25°C sıcaklık için yorulma direnç parametresi ($G^* \cdot \sin \delta$)

8.1.5. Kiriş eğme reometresi (BBR) deney sonuçları

Kiriş eğme reometresi deney sonuçları Şekil 8.14’de verilmiş olup, her iki katkı malzemesi ile yapılan modifiye işlemi sonucunda numunelerin sünme rijitliği artmaktadır.



Şekil 8.14. -18°C Sıcaklıkta $t=60$ s için katkı tip ve oranlarına göre sünme rijitliği (S) değişimi

8.1.6. Modifiye bitüm PG sınıfının belirlenmesi

Yaşlandırılmamış normal, NMS ve NK modifiye numuneler katkı oranına bağlı olmaksızın $G^*/\sin\delta \geq 1000$ Pa şartını en yüksek 64°C için sağlamaktadır. 70°C deney sıcaklığına çıkıldığında kriter sağlanmamaktadır. Bu nedenle normal ve modifiye bitümlerin yüksek sıcaklık sınıfı PG 64-Y'dir. DSR ve BBR deneyleri neticesinde normal, NMS ve NK modifiye bitümlerin yüksek ve düşük sıcaklık PG sınıfları Çizelge 8.12'de verilmiştir.

Çizelge 8.12. Normal, NMS ve NK modifiye bitümler yüksek ve düşük sıcaklık PG sınıfları

		G*/Sinδ (Pa)								
	Numune	Normal	1 NMS	3 NMS	5 NMS	8 NMS	1 NK	3 NK	5 NK	8 NK
DSR	64°C	1158	1450	1532	1569	1959	1431	1621	1685	1851
	70°C	524	653	679	725	876	658	747	771	852
	Yüksek Sıcaklık PG	64	64	64	64	64	64	64	64	64
		Sünme Rijitliği, S (Mpa)								
BBR	-12°C	238	243	255	268	271	252	257	266	270
	-18°C	483	498	512	515	555	542	527	539	545
	Düşük Sıcaklık PG	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16
	PG Bitüm Sınıfı	64-16								

8.1.7. Optimum katkı oranı

Çalışma kapsamında optimum katkı oranının tayininde; normal ve modifiye bitüm numuneleri üzerinde yapılan dönel viskozimetre deney sonuçları, yaşlandırılmamış ve yaşlandırılmış numune DSR deney sonuçları esas alınmıştır.

Viskozite ve yaşlandırılmamış numune DSR deney sonuçlarına göre; her iki katkı için de geçerli olmak üzere, %1 oranından itibaren %8 oranına kadar katkı oranı arttırıldıkça, numunelerin viskozitesi ve tekerlek izi dayanımı artmaktadır.

Ancak yaşlandırılmış numune DSR deney sonuçlarına göre, en yüksek yorulma dayanımı her iki katkı içinde %5 oranında elde edilmekte, %8 katkı oranında Şekil 8.13'den görülebileceği üzere, yorulma dayanımı azalmaktadır.

Modifiye işleminin başlıca hedefleri katkı malzemesinin maliyetlerde getireceği artışın kabul edilebilir seviyede kalması ve asfalt betonun yorulma dayanımının artırılması olduğundan; optimum katkı oranının %5 olarak seçilmesinin uygun olacağı değerlendirilmiştir.

8.2. BSK Deneyleri

Superpave tasarım yönteminde hazırlanacak asfalt beton numunelerin optimum bitüm oranının (OBO) tayini amacıyla, öncelikle Marshall tasarım yöntemine uygun olarak BSK numuneleri hazırlanmasının uygun olacağı değerlendirilmiştir. Bu kapsamda; %3,5 - 6,5 bitüm oranlarında, her katkı oranında 3 adet olmak üzere; normal bitüm, NMS ve NK için 21'er adet olmak üzere toplam 63 marshall asfalt beton numunesi dökülmüştür. Modifiye asfalt beton numunelerin hazırlanmasında; Bölüm 8.1.7'de belirtildiği üzere her iki katkı türü için de optimum katkı oranı %5 olarak kullanılmıştır.

8.2.1. Marshall deneyleri

Çalışma kapsamında toplam 63 adet Marshall numunesi dökülmüştür. Aşınma tabakası için tasarım yapılmıştır. Her bir numune için 1150 g agrega kullanılmış ve %3,5-6,5 bitüm oranları için 3'er numune dökülmüştür. Numunelerin yükseklik ve ağırlık ölçümleri yapılarak, yoğunluk ve hacim hesaplamaları yapılmıştır. Normal, NMS ve NK modifiye asfalt beton numunelerin numune uygunluk grafikleri çizilmiştir. Uygun olmayan numuneler tekrar dökülmüştür.

Marshall deney sonuçları (Marshall tabloları ve OBO tayininde yararlanılan grafikler) Ek.1'de verilmiştir.

Stabilite, BSK'ların kalıcı deformasyonlara karşı gösterdiği direnç olarak tarif edilir. Stabilitenin yüksek olması, üstyapının kalıcı deformasyonlara karşı daha dirençli

olduğunu gösterir. Ancak stabilitenin çok yüksek olması halinde, üstyapının esnek davranış özelliği azalır ve yükleme koşulları altında çatlaklar oluşmasına sebep olur.

8.2.1.1. Normal bitüm Marshall deneyleri

Normal bitüm ile hazırlanan marshall numuneleri için; her bir bitüm içeriğinde dökülen üç numuneden elde edilen değerlerin ortalamalarının gösterildiği özet tablosu Çizelge 8.13’de verilmiştir.

Çizelge 8.13. Normal bitüm Marshall tasarım özet tablosu

50-70	Bitüm Oranı	VMA	Bitümle Dolu Boşluk Oranı (BDBO)	Boşluk Oranı (BO)	Pratik Özgül Ağırlık, (PÖA)	Marshall Stabilite (MS)	Akma	MQ		Oran
	(%)	(%)	(%)	(%)	(g/cm ³)	(kg)	(mm)			
1	3,5	14,56	54,07	6,65	2387,86	1372,07	1,50	932,73		
2	4,0	13,67	66,29	4,83	2417,08	1541,52	2,22	706,95	PÖA	5,42
3	4,5	13,36	76,66	3,34	2437,67	1568,33	2,08	777,48	MS	4,21
4	5,0	13,18	86,43	2,00	2454,28	1386,05	2,74	514,84	BO	4,23
5	5,5	13,36	93,59	1,07	2460,82	1253,24	3,52	362,05	BDBO	4,13
6	6,0	14,17	95,38	0,87	2449,38	1021,43	4,35	238,19		
7	6,5	15,12	95,76	0,85	2433,67	906,69	5,12	177,08	ORT	4,50

Optimum bitüm oranının tayini için, farklı bitüm oranları ile hazırlanmış numunelerin Marshall dayanım, boşluk oranı, pratik özgül ağırlığı, bitümle dolu boşluk oranı, agregalar arası boşluk oranı ve akma değerleri bulunup grafikleri çizilir. (Ek.1.)

Marshall dayanımı ve pratik özgül ağırlığı maksimum yapan; boşluk oranını %4 yapan, bitümle dolu boşluk oranı için %70’e karşılık gelen bitüm oranları grafikler yardımıyla bulunur. Bulunan 4 değerlerin ortalaması alınarak, optimum bitüm yüzdesi belirlenir.

Normal bitüm ile hazırlanan asfalt beton numuneleri için;

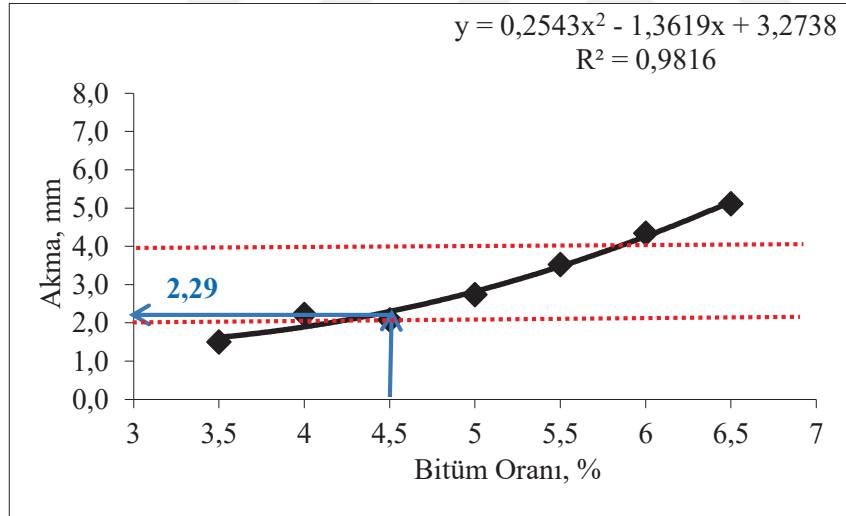
$$OBO = (5,42+4,21+4,23+4,13) / 4 = \mathbf{4,50} \quad \text{olarak bulunur.}$$

Bulunan OBO, akma-bitüm oranı grafiğinde yerine konularak, akma değerinin şartname değerleri (2-4 mm) sınırları içerisinde kalıp kalmadığı kontrol edilir. Normal bitüm için OBO Marshall deney sonuçları Çizelge 8.14’de gösterilmiştir.

Çizelge 8.14. Normal bitüm OBO marshall deney sonuçları

	Sonuç
Pratik özgül ağırlık, g/cm ³	2440,7
Marshall dayanımı, kg	1484,7
Boşluk oranı, %	3,2
Bitümle dolu boşluk oranı, %	77,8
Agregalar arası boşluk oranı, %	13,27
Akma, mm	2,29

Bitüm oranı %4,50’ye karşılık gelen akma değeri Şekil 8.15’de gösterildiği üzere 2,29 mm olarak bulunmuştur.



Şekil 8.15. Normal bitüm marshall numuneleri akma-bitüm oranı grafiği

8.2.1.2. NMS modifiye bitüm Marshall deneyleri

NMS modifiye bitüm ile hazırlanan marshall numuneleri için; her bir bitüm içeriğinde dökülen üç numuneden elde edilen değerlerin ortalamalarının gösterildiği özet tablo Çizelge 8.15’de verilmiştir.

Çizelge 8.15. NMS modifiye bitüm Marshall tasarım özet tablosu

NMS	Bitüm Oranı	VMA	Bitümle Dolu Boşluk Oranı (BDBO)	Boşluk Oranı (BO)	Pratik Özgül Ağırlık (PÖA)	Marshall Stabilité , (MS)	Akma	MQ		Oran
	(%)	(%)	(%)	(%)	(g/cm ³)	(kg)	(mm)			
1	3,5	14,49	54,30	6,66	2387,44	1580,11	1,66	975,23		
2	4,0	13,66	66,37	4,82	2417,31	1638,42	1,87	898,49	PÖA	5,51
3	4,5	13,39	76,42	3,38	2436,50	1606,05	1,90	845,80	MS	4,00
4	5,0	13,07	87,29	1,89	2457,20	1523,29	2,33	654,97	BO	4,23
5	5,5	13,19	95,05	0,88	2465,58	1409,41	3,69	398,84	BDBO	4,12
6	6,0	13,97	96,97	0,64	2454,96	1203,91	4,23	284,79		
7	6,5	14,84	97,87	0,54	2441,50	1050,68	4,85	217,41	ORT	4,47

NMS modifiye bitüm ile hazırlanan asfalt beton numuneleri için;

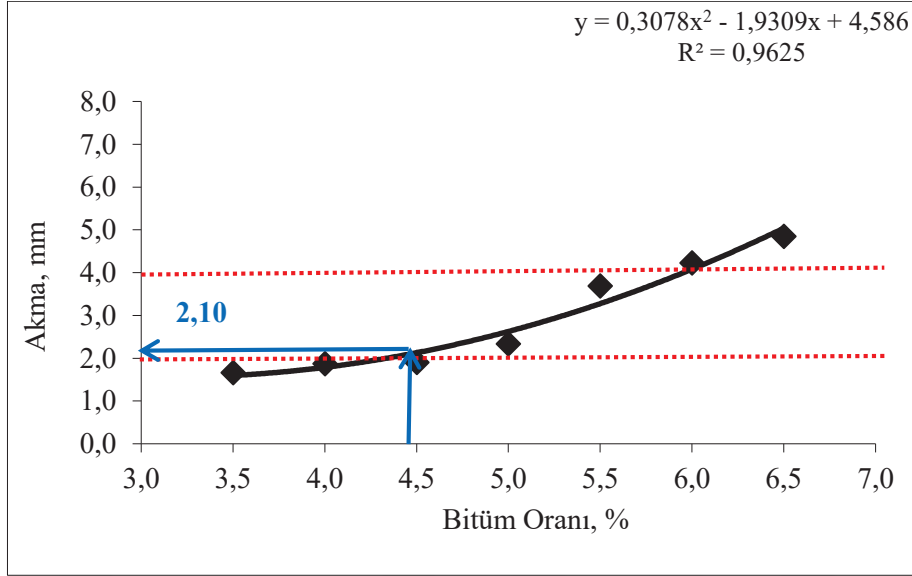
$$BO = (5,51+4,00+4,23+4,12) / 4 = \mathbf{4,47} \quad \text{olarak bulunur.}$$

Bulunan OBO akma-bitüm oranı grfiğinde yerine konularak, akma değerin şartname değerleri (2-4 mm) sınırları içerisinde kalıp kalmadığı kontrol edilir. NMS modifiye bitüm için OBO Marshall deney sonuçları Çizelge 8.16’da gösterilmiştir.

Çizelge 8.16. NMS modifiye bitüm OBO marshall deney sonuçları

	Sonuç
Pratik özgül ağırlık, g/cm ³	2440,3
Marshall dayanımı, kg	1599,1
Boşluk oranı, %	3,3
Bitümle dolu boşluk oranı, %	77,5
Agregalar arası boşluk oranı, %	13,24
Akma, mm	2,10

Bitüm oranı %4,47’ye karşılık gelen akma değeri Şekil 8.16’da gösterildiği üzere 2,10 mm olarak bulunmuştur.



Şekil 8.16. NMS modifiye bitüm marshall numuneleri akma-bitüm oranı grafiği

8.2.1.3. NK modifiye bitüm Marshall deneyleri

NK modifiye bitüm ile hazırlanan marshall numuneleri için; her bir bitüm içeriğinde dökülen üç numuneden elde edilen değerlerin ortalamalarının gösterildiği özet tablosu Çizelge 8.17’de verilmiştir.

Çizelge 8.17. NK modifiye bitüm Marshall tasarım özet tablosu

NK	Bitüm Oranı	VMA	Bitümle Dolu Boşluk Oranı (BDBO)	Boşluk Oranı (BO)	Pratik Özgöl Ağırlık (PÖA)	Marshall Stabilite, (MS)	Akma	MQ		Oran
	(%)	(%)	(%)	(%)	(g/cm³)	(kg)	(mm)			
1	3,5	14,39	54,64	6,75	2385,28	1475,08	1,71	866,60		
2	4,0	13,70	66,11	4,86	2416,11	1555,06	2,04	803,14	PÖA	5,70
3	4,5	13,63	74,85	3,65	2429,80	1573,90	2,09	758,40	MS	4,22
4	5,0	13,46	84,34	2,33	2446,00	1498,48	2,38	630,54	BO	4,32
5	5,5	13,55	92,08	1,29	2455,28	1322,54	3,36	401,18	BDBO	4,18
6	6,0	13,95	97,12	0,62	2455,50	1148,33	3,84	299,92		
7	6,5	14,79	98,26	0,48	2442,95	961,31	4,86	199,16	ORT	4,60

NK modifiye bitüm ile hazırlanan asfalt beton numuneleri için;

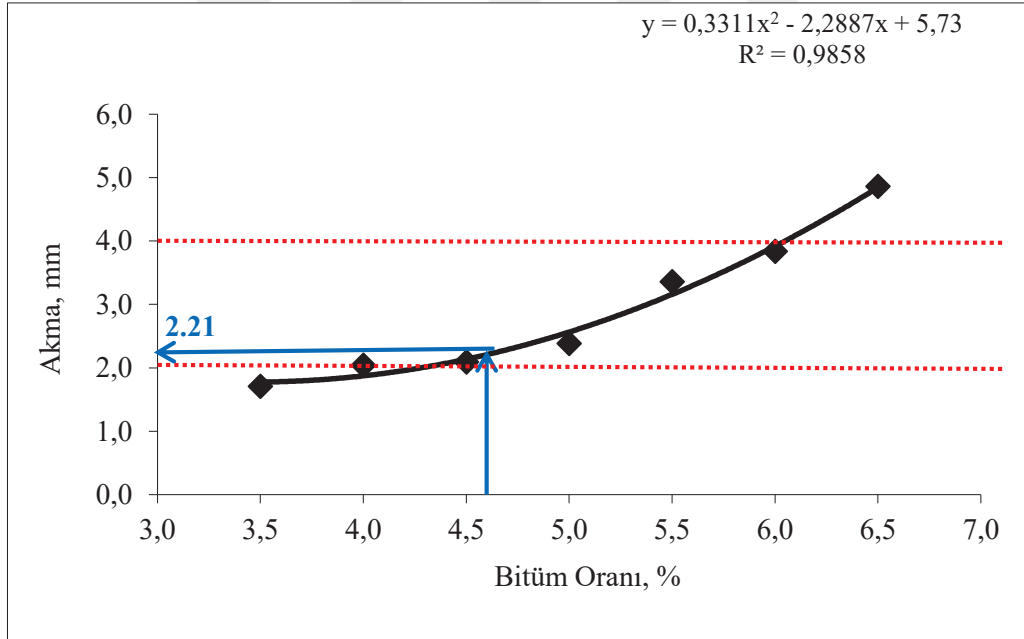
$$OBO = (5,70 + 4,22 + 4,32 + 4,18) / 4 = 4,60 \text{ olarak bulunur.}$$

Bulunan OBO akma-bitüm oranı grafiğinde yerine konularak, akma değerinin şartname değerleri (2-4 mm) sınırları içerisinde kalıp kalmadığı kontrol edilir. NK modifiye bitüm için OBO Marshall deney sonuçları Çizelge 8.18’de gösterilmiştir.

Çizelge 8.18. NK modifiye bitüm OBO marshall deney sonuçları

	Sonuç
Pratik özgül ağırlık, g/cm ³	2437,1
Marshall dayanımı, kg	1536,1
Boşluk oranı, %	3,2
Bitümle dolu boşluk oranı, %	78,1
Agregalar arası boşluk oranı, %	13,46
Akma, mm	2,21

Bitüm oranı %4,60’a karşılık gelen akma değeri Şekil 8.17’de gösterildiği üzere 2,21 mm olarak bulunmuştur.



Şekil 8.17. NK modifiye bitüm marshall numuneleri akma-bitüm oranı grafiği

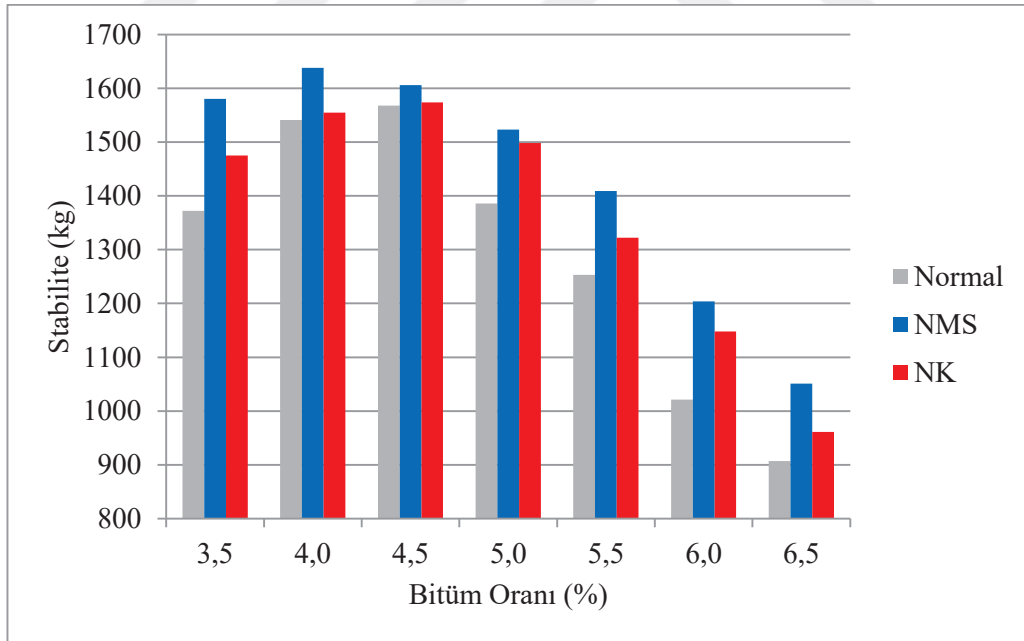
8.2.1.4. Marshall deneyi toplu sonuçları

Normal bitüm, NMS ve NK modifiye bitüm ile marshall yöntemine göre hazırlanan BSK numuneleri deney sonuçları özeti Çizelge 8.19’da verilmiştir.

Çizelge 8.19. Marshall deneyi toplu sonuçları

		Bitüm oranı, %			
		Normal	NMS	NK	
	Pratik özgül ağırlık (en yüksek)	5,42	5,51	5,70	
	Marshall dayanımı (en yüksek)	4,21	4,00	4,22	
	Boşluk oranı (%4)	4,23	4,23	4,32	
	Bitümle dolu boşluk oranı (%70)	4,13	4,12	4,18	
	Ortalama	4,50	4,47	4,60	
	OBO için	Pratik özgül ağırlık, kg/m³	2440,7	2440,3	2437,1
		Marshall dayanımı, kg	1484,7	1599,1	1536,1
Boşluk oranı, %		3,2	3,3	3,2	
Bitümle dolu boşluk oranı, %		77,8	77,5	78,1	
Agregalar arası boşluk oranı, %		13,27	13,24	13,46	
Akma, mm		2,29	2,10	2,21	

Normal bitüm, NMS ve NK modifiye bitüm ile hazırlanan BSK numuneleri stabilite deney sonuçları Şekil 8.18’de gösterilmiştir.

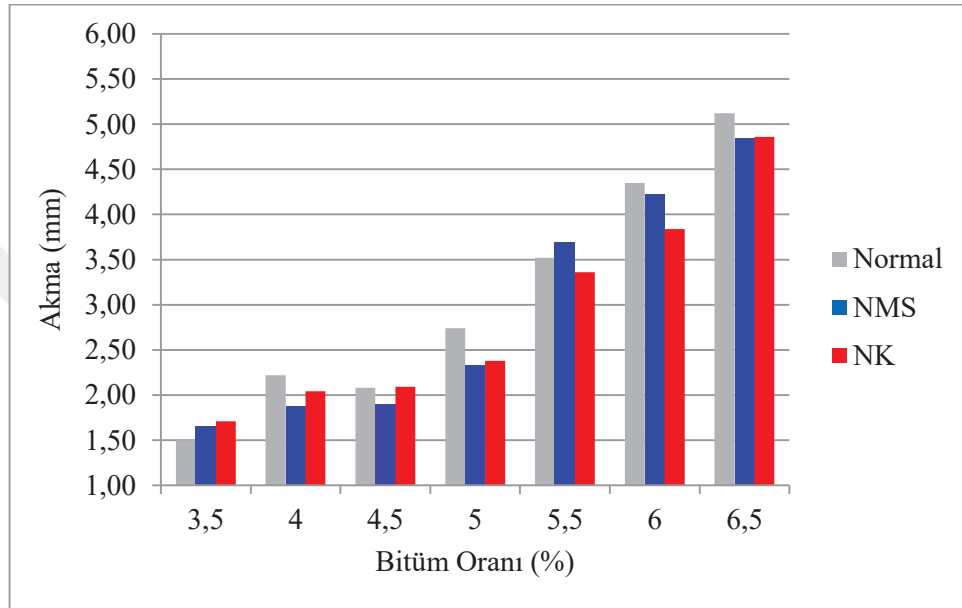


Şekil 8.18. Normal, NMS ve NK katkılı BSK numuneleri stabilite-bitüm oranı değişimi

NMS modifiye bitüm ile hazırlanan BSK numunelerinin ortalama stabilite değerleri, normal bitüm ile hazırlanan numunelerin stabilite değerlerine kıyasla ortalama %11 daha yüksektir. Benzer şekilde NK modifiye bitüm ile hazırlanan BSK numunelerinin

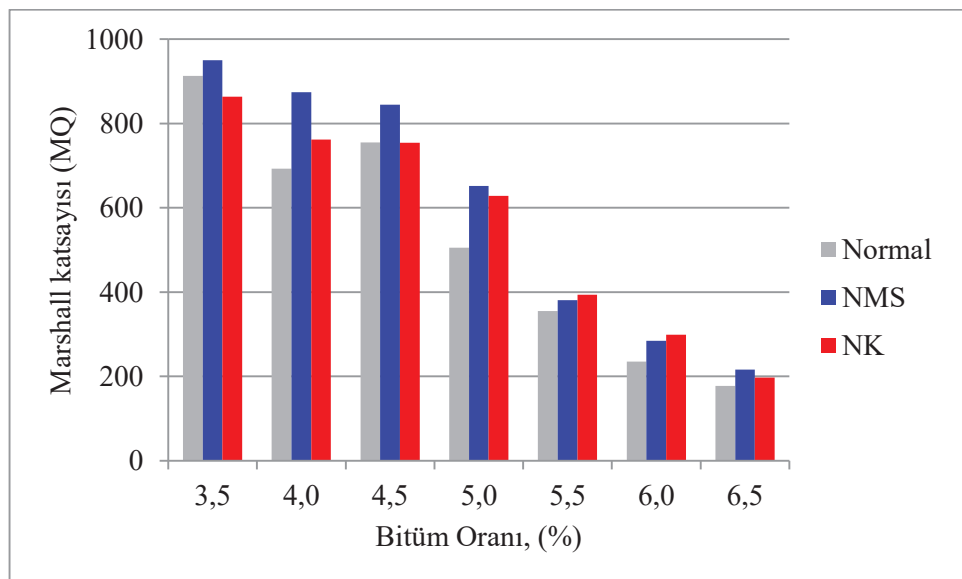
ortalama stabilite değerlerinin, normal bitüm ile hazırlanan numunelerin stabilite değerlerinden ortalama %5 daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.

Normal bitüm, NMS ve NK modifiye bitüm ile hazırlanan BSK numunelerinde bitüm oranı ile akma değerlerinin değişimi Şekil 8.19’da gösterilmiştir.



Şekil 8.19. Normal, NMS ve NK katkılı BSK numuneleri akma-bitüm oranı değişimi

Normal bitüm, NMS ve NK modifiye bitüm ile hazırlanan BSK numunelerinde bitüm oranı ile Marshall katsayısı (MQ) değerlerinin değişimi Şekil 8.20’de gösterilmiştir.



Şekil 8.20. Normal, NMS ve NK katkılı BSK numuneleri MQ-bitüm oranı değişimi

8.2.2. Superpave deneyleri

Normal bitüm, NMS ve NK modifiye bitüm ile marshall yöntemine göre hazırlanan BSK numunelerinin deney sonuçlarının değerlendirilmesi neticesinde tespit edilen optimum bitüm oranları dikkate alınarak Çizelge 8.20’de belirtilen bitüm oranlarında her oran için iki adet numune dökülmüştür. Normal bitüm, optimum katkı oranında (%5) NMS modifiye bitüm ve NK modifiye bitüm için 8’er adet olmak üzere, toplam 24 numune yoğurmalı sıkıştırıcı ile dökülmüştür. Dökümlerde Controls marka İtalyan yapımı yoğurmalı sıkıştırıcıdan yararlanılmıştır. Ayrıca dökülen 24 numune, gevşek asfalt beton karışımının maksimum teorik özgül ağırlıklarının (G_{mm}) tayininde kullanılmıştır.

Çizelge 8.20. Bitüm tip ve oranlarına göre yoğurmalı sıkıştırıcı ile dökülen numuneler

Bitüm tipi	Bitüm oranları				Toplam numune
Normal	% 4,00	%4,50	%5,00	%5,50	8 adet
NMS	%3,97	%4,47	%4,97	%5,47	8 adet
NK	%4,10	%4,60	%5,10	%5,60	8 adet

8.2.2.1. Normal bitüm Superpave BSK deneyleri

Her bir bitüm oranı için BSK’nın gevşek haldeki maksimum teorik özgül ağırlık (G_{mm}) ve sıkışmış hacim özgül ağırlık (G_{mb}) değerleri belirlenerek Çizelge 8.21’de gösterilmiştir.

Çizelge 8.21. Normal bitüm BSK numuneleri fiziksel özellikleri

Bitüm oranı	W_b	Numune-1				Numune-2				G_{mm}
		A (kuru)	B (YKSD)	C (sudaki)	G_{mb} (ölç.)	A (kuru)	B (YKSD)	C (sudaki)	G_{mb} (ölç.)	
(%)	(g)	(g)	(g)	(g)	(g/cm ³)	(g)	(g)	(g)	(g/cm ³)	(g/cm ³)
4,0	46,00	1189,9	1198,5	704,4	2,408	1189,1	1198,8	702,7	2,397	2,519
4,5	51,75	1193,8	1200,3	711,2	2,441	1194,0	1201,7	704,8	2,403	2,512
5,0	57,50	1197,7	1202,9	718,2	2,471	1193,6	1198,5	709,1	2,439	2,508
5,5	63,25	1201,5	1204,3	718,1	2,471	1205,2	1208,9	720,4	2,467	2,496

YKSD: Yüzey kuru suya uygun

%4 bitüm oranına sahip Numune-1 için sıkışmış hacim özgül ağırlık;

$$G_{mb} = \frac{A}{(B-C)} = \frac{1189,9}{1198,5-704,4} = \frac{1189,9}{494,1} = 2,408 \text{ g/cm}^3$$

olarak hesaplanabilir. Diğer numuneler için de sıkışmış hacim özgül ağırlık değerleri benzer şekilde hesaplanır.

Seçilen tasarım agrega gradasyonunda, %4,0; %4,5; %5,0 ve %5,5 bitüm içeriklerinde hazırlanan BSK numuneleri yoğurmalı sıkıştırıcı ile sıkıştırılmıştır. BSK numunelerine ait sıkıştırma karakteristikleri Çizelge 8.22-8.25’de verilmiştir.

Çizelge 8.22. Normal bitüm BSK %4.0 bitüm oranı sıkıştırma karakteristikleri

Devir Sayısı	KONTROL 4001		W _m =1189,9 g		KONTROL 4002		W _m =1189,1 g		Ortalama G _{mm}
	H	G _{mb} (tah)	G _{mb} (düz,)	G _{mm}	H	G _{mb} (tah)	G _{mb} (düz,)	G _{mm}	
	(mm)	(g/cm³)	(g/cm³)	(%)	(mm)	(g/cm³)	(g/cm³)	(%)	
9	72,8	2,082	2,166	85,95	73,3	2,066	2,161	85,75	85,85
20	70,3	2,156	2,243	89,00	70,4	2,152	2,251	89,32	89,16
50	67,9	2,232	2,322	92,14	68,0	2,228	2,330	92,46	92,30
100	66,2	2,290	2,383	94,56	66,9	2,264	2,368	93,97	94,27
139	65,5	2,314	2,408	95,55	66,1	2,292	2,397	95,12	95,33
G _{mb} (ölçülen)		2,408			2,397				
Düz, Faktörü (C)		1,0406			1,0458				
G _{mm} (ölçülen)		2,520							

Çizelge 8.22’de tasarım yoğurma sayısında (N_{des}=139) KONTROL 4001 numunesi için gösterilen hesaplamalar aşağıdaki gibi yapılmıştır.

W_m=1189,9 g olup,

$$V_{mx} = \frac{\pi d^2 h_x}{4} * 0,001$$

denklemleri ile numunenin herhangi bir yükseklikte hacmi hesaplanabilir.

$$V_{mx} = \frac{3,14 * (100)^2 * 65,5}{4} * 0,001 = 514,17 \text{ cm}^3$$

$$G_{mb(tahmini)} = \frac{\left(\frac{W_m}{V_{mx}}\right)}{\gamma_{su}} = \frac{\left(\frac{1189,9}{514,17}\right)}{1} = 2,314 \text{ g/cm}^3$$

$$G_{mb(tahmini)} = 2,314 \text{ g/cm}^3$$

$$G_{mb}(\text{ölçülen}) = 2,408 \text{ g/cm}^3$$

$$C = \frac{G_{mb(ölçülen)}}{G_{mb(tahmini)}} = \frac{2,408}{2,314} = 1,0406$$

$$G_{mb(düzeltilmiş)} = C * G_{mb(tahmini)} = 2,314 * 1,0406 = 2,408 \text{ g/cm}^3$$

$$\%G_{mm} = 100 * \frac{G_{mb} \text{ (düzeltilmiş)}}{G_{mm} \text{ (ölçülen)}} = 100 * \frac{2,408}{2,520} = 95,55$$

KONTROL 4002 numunesi için de $\%G_{mm}$ benzer şekilde hesaplanarak $\%95,12$ olarak bulunmuştur. Normal bitüm ile hazırlanan ve $\%4$ oranında bitüm içeren BSK numuneleri için;

Ortalama %G_{mm} = (95,55 + 95,12) / 2 = 95,33 olarak hesaplanır.

Çizelge 8.23. Normal bitüm BSK %4,5 bitüm oranı sıkıştırma karakteristikleri

Devir Sayısı	KONTROL 4501		W _m =1193,8 g		KONTROL 4502		W _m =1194,0 g		Ortalama G _{mm}
	H	G _{mb} (tah)	G _{mb} (düz.)	G _{mm}	H	G _{mb} (tah)	G _{mb} (düz.)	G _{mm}	
	(mm)	(g/cm ³)	(g/cm ³)	(%)	(mm)	(g/cm ³)	(g/cm ³)	(%)	
9	72,1	2,109	2,191	87,22	73,2	2,078	2,157	85,87	86,55
20	69,2	2,198	2,283	90,88	70,4	2,160	2,242	89,25	90,07
50	66,7	2,280	2,368	94,27	67,7	2,247	2,332	92,83	93,55
100	65,3	2,329	2,419	96,30	66,3	2,294	2,381	94,78	95,54
139	64,7	2,350	2,441	97,17	65,7	2,315	2,403	95,66	96,42
G _{mb} (ölçülen)		2,441			2,403				
Düz, Faktörü (C)		1,0387			1,0380				
G _{mm} (ölçülen)		2,512							

Çizelge 8.24. Normal bitüm BSK %5,0 bitüm oranı sıkıştırma karakteristikleri

Devir Sayısı	KONTROL 5001		W _m =1197,7 g		KONTROL 5002		W _m =1193,6 g		Ortalama G _{mm}
	H	G _{mb} (tah)	G _{mb} (düz,)	G _{mm}	H	G _{mb} (tah)	G _{mb} (düz,)	G _{mm}	
	(mm)	(g/cm³)	(g/cm³)	(%)	(mm)	(g/cm³)	(g/cm³)	(%)	
9	71,7	2,128	2,202	87,80	72,8	2,089	2,185	87,12	87,46
20	69,0	2,211	2,288	91,23	70,1	2,169	2,269	90,47	90,85
50	66,3	2,301	2,381	94,94	67,6	2,249	2,352	93,78	94,36
100	64,4	2,369	2,451	97,73	65,9	2,307	2,413	96,21	96,97
139	63,9	2,388	2,471	98,52	65,2	2,332	2,439	97,25	97,89
G _{mb} (ölçülen)		2,471			2,439				
Düz, Faktörü (C)		1,0348			1,0459				
G _{mm} (ölçülen)		2,508							

Çizelge 8.25. Normal bitüm BSK %5.5 bitüm oranı sıkıştırma karakteristikleri

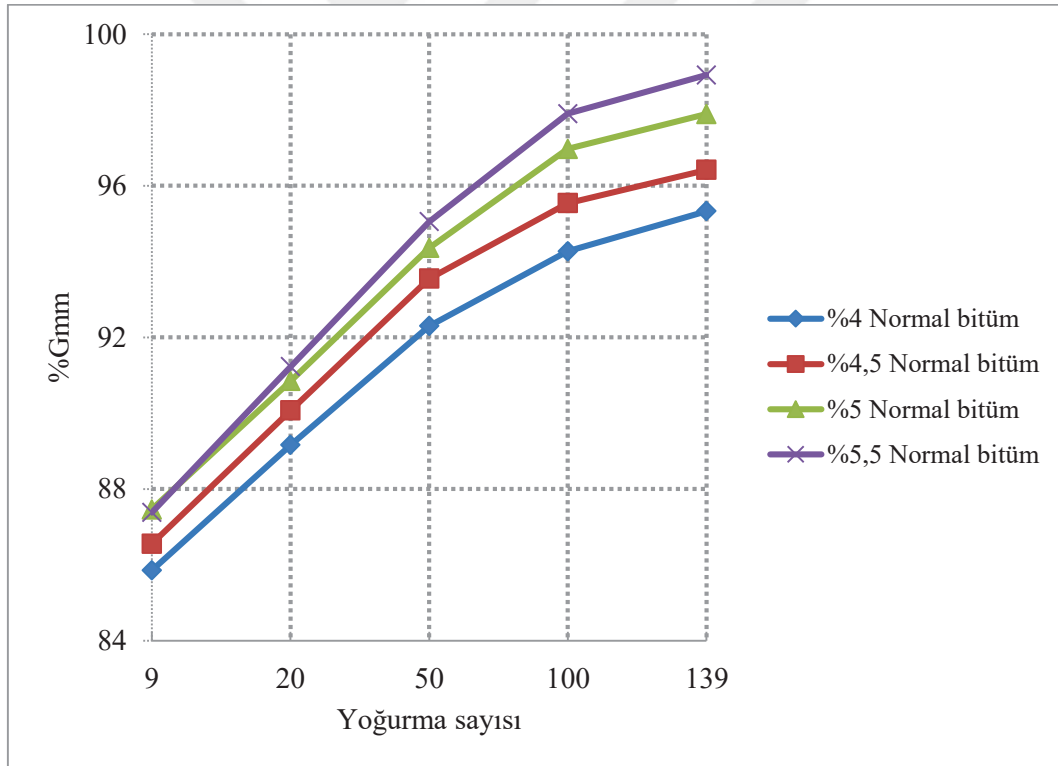
Devir Sayısı	KONTROL 5501		W _m =1201,5 g		KONTROL 5502		W _m =1205,2 g		Ortalama G _{mm}
	H	G _{mb} (tah)	G _{mb} (düz,)	G _{mm}	H	G _{mb} (tah)	G _{mb} (düz,)	G _{mm}	
	(mm)	(g/cm ³)	(g/cm ³)	(%)	(mm)	(g/cm ³)	(g/cm ³)	(%)	
9	72,5	2,111	2,184	87,50	72,5	2,118	2,178	87,26	87,38
20	69,5	2,202	2,279	91,31	69,4	2,212	2,275	91,15	91,23
50	66,7	2,295	2,375	95,15	66,6	2,305	2,370	94,95	95,05
100	64,9	2,358	2,440	97,76	64,5	2,380	2,447	98,04	97,90
139	64,1	2,388	2,471	99,00	64,0	2,399	2,467	98,84	98,92
G _{mb} (ölçülen)		2,471			2,467				
Düz, Faktörü (C)		1,0348			1,0283				
G _{mm} (ölçülen)		2,496							

Normal bitüm ile %4,0; %4,5; %5,0 ve %5,5 bitüm içeriklerinde hazırlanan BSK numunelerinin stabilite ve akma değerleri Çizelge 8.26'da gösterilmiştir.

Çizelge 8.26. Normal bitüm BSK numuneleri stabilite-akma değerleri

Numune no	Bitüm	MS düzeltilmiş	Ortalama MS	Akma
	(%)	(kg)	(kg)	(mm)
KONTROL 4001	4,0	1776,7	1795,7	3,60
KONTROL 4002	4,0	1814,8		3,28
KONTROL 4501	4,5	1735,3	1652,6	4,09
KONTROL 4502	4,5	1569,9		3,27
KONTROL 5001	5,0	1816,8	1719,1	4,49
KONTROL 5002	5,0	1621,3		2,74
KONTROL 5501	5,5	1275,5	1315,5	4,61
KONTROL 5503	5,5	1355,5		5,57

Normal bitüm ile %4,0; %4,5; %5,0 ve %5,5 bitüm içeriklerinde hazırlanan BSK numunelerinin ortalama yoğunluk eğrileri Şekil 8.21’de gösterilmiştir.



Şekil 8.21. Normal bitüm BSK numuneleri ortalama yoğunluk eğrileri

Normal bitüm ile hazırlanan BSK numunelerinin hacim özellikleri ve yoğunluk değerlerinin gösterildiği özet Çizelge 8.27’de verilmiştir.

Çizelge 8.27. Normal bitüm ile hazırlanan BSK numunelerinin hacim özellikleri ve yoğunluk değerleri

Bitüm tipi ve oranı	%G _{mm} @N _{ini}	%G _{mm} @N _{des}	% V	% VMA	% VFA	DP
% 4,0 Normal	85,85	95,33	4,67	14,33	67,4	1,25
% 4,5 Normal	86,55	96,42	3,58	14,08	74,6	1,12
% 5,0 Normal	87,46	97,89	2,11	13,36	84,2	1,02
% 5,5 Normal	87,38	98,92	1,08	13,33	91,9	0,93

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

%4,0 bitüm oranına sahip numuneler için; $V = 100 - 95,33 = \% 4,67$

%4,5 bitüm oranına sahip numuneler için; $V = 100 - 96,42 = \% 3,58$

%5,0 bitüm oranına sahip numuneler için; $V = 100 - 97,89 = \% 2,11$

%5,5 bitüm oranına sahip numuneler için; $V = 100 - 98,92 = \% 1,08$

$$\%VMA = 100 - \left(\frac{\%G_{mm}@N_{des} * G_{mm} * P_s}{G_{sb}} \right) \quad (8.1) \text{ olarak hesaplanır.}$$

Burada;

P_s : Agrega yüzdesi,

G_{sb} : Agrega karışımı hacim özgül ağırlığı'dır.

Her bitüm oranında agregalar arası boşluk (VMA) değerinin hesaplanabilmesi için öncelikle, agrega karışımının hacim özgül ağırlığı bilinmelidir. Agrega karışımındaki kaba, ince, filler agrega malzemesinin zahiri, hacim ve yüzey kuru suya doygun özgül ağırlık değerleri Çizelge 8.28'de verilmiştir. Agrega karışımının hacim özgül ağırlığı aşağıdaki bağıntı yardımıyla hesaplanmıştır. Ancak fillerin hacim özgül ağırlığını tespit etmek güç olduğundan, zahiri özgül ağırlık değeri kullanılmıştır.

Çizelge 8.28. Kaba, ince ve filler agrega özgül ağırlık değerleri

	Zahiri ÖA	Hacim ÖA	Birleşim Oranı
Kaba Agrega	2,684	2,669	51
İnce Agrega	2,719	2,715	43,5
Filler	2,728		5,5

$$G_{sb} = \frac{P_1 + P_2 + \dots + P_n}{\frac{P_1}{G_1} + \frac{P_2}{G_2} + \dots + \frac{P_n}{G_n}}$$

bağıntısı ile agrega karışımının hacim özgül ağırlığı hesaplanabilir.

$$\text{Buradan; } G_{sb} = \frac{100}{\frac{43,5}{2,715} + \frac{51}{2,669} + \frac{5,5}{2,728}} = 2,692$$

$$G_{sa} = \frac{100}{\frac{43,5}{2,719} + \frac{51}{2,684} + \frac{5,5}{2,728}} = 2,702 \text{ g/cm}^3 \text{ olarak bulunur.}$$

$$\%4,0 \text{ bitüm oranına sahip numuneler için; } VMA = 100 - \left(\frac{95,33 \cdot 2,520 \cdot 0,96}{2,692} \right) = \%14,33$$

$$\%4,5 \text{ bitüm oranına sahip numuneler için; } VMA = 100 - \left(\frac{96,42 \cdot 2,512 \cdot 0,955}{2,692} \right) = \%14,08$$

$$\%5,0 \text{ bitüm oranına sahip numuneler için; } VMA = 100 - \left(\frac{97,89 \cdot 2,508 \cdot 0,95}{2,692} \right) = \%13,36$$

$$\%5,5 \text{ bitüm oranına sahip numuneler için; } VMA = 100 - \left(\frac{98,92 \cdot 2,496 \cdot 0,945}{2,692} \right) = \%13,33$$

$$\%VFA = 100 * \frac{(\%VMA - V)}{\%VMA}$$

$$\%4,0 \text{ bitüm oranına sahip numuneler için; } VFA = 100 * \frac{14,33 - 4,67}{14,33} = \%67,4$$

$$\%4,5 \text{ bitüm oranına sahip numuneler için; } VFA = 100 * \frac{14,08 - 3,58}{14,08} = \%74,6$$

$$\%5,0 \text{ bitüm oranına sahip numuneler için; } VFA = 100 * \frac{13,36 - 2,11}{13,36} = \%84,2$$

$$\%5,5 \text{ bitüm oranına sahip numuneler için; } VFA = 100 * \frac{13,33 - 1,08}{13,33} = \%91,9$$

$$P_{be} = P_b - (P_s * G_b) * \frac{G_{se} - G_{sb}}{G_{se} * G_{sb}}$$

$$G_{se} = G_{sb} + 0,8 * (G_{sa} - G_{sb}) \quad \text{olarak hesaplanır.}$$

Burada;

P_{be} : Toplam karışım ağırlığının yüzdesi olarak efektif bitüm içeriği,

G_{se} : Agregat karışımı efektif özgül ağırlığı,

P_b : Bitüm içeriği,

G_b : Bitüm özgül ağırlığı'dır.

$DP = P_{0.075} / P_{be}$ olarak her bitüm yüzdesi için ayrı ayrı hesaplanır.

$$G_{se} = 2,692 + 0,8 (2,702 - 2,692) = 2,700$$

$$\%4,0 \text{ bitüm oranına sahip numuneler için; } P_{be} = 4,0 - (96,0 * 1,026) \frac{2,700-2,692}{2,700*2,692} = 4,39$$

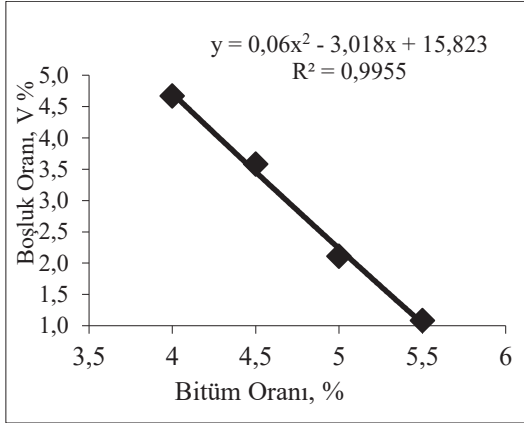
$$\%4,5 \text{ bitüm oranına sahip numuneler için; } P_{be} = 4,5 - (95,5 * 1,026) \frac{2,700-2,692}{2,700*2,692} = 4,89$$

$$\%5,0 \text{ bitüm oranına sahip numuneler için; } P_{be} = 5,0 - (95,0 * 1,026) \frac{2,700-2,692}{2,700*2,692} = 5,39$$

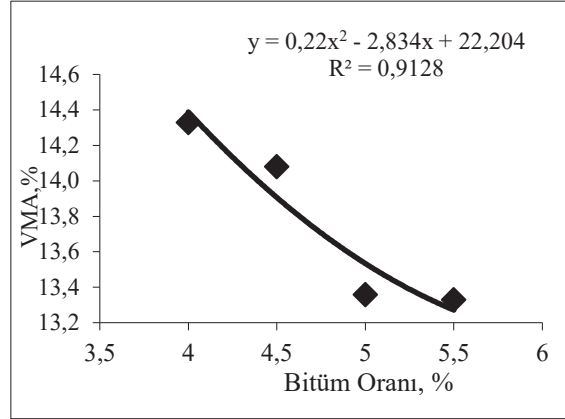
$$\%5,5 \text{ bitüm oranına sahip numuneler için; } P_{be} = 5,5 - (94,5 * 1,026) \frac{2,700-2,692}{2,700*2,692} = 5,89$$

$$DP_1 = 5,5/4,39 = 1,25; DP_2 = 5,5/4,89 = 1,12; DP_3 = 5,5/5,39 = 1,02; DP_4 = 5,5/5,89 = 0,93$$

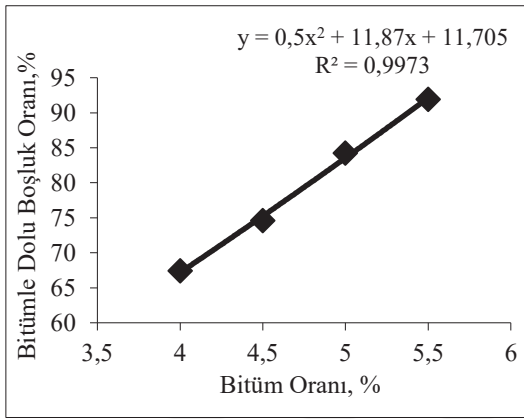
Tasarım yoğurma sayısında hesaplanan V, VMA, VFA, DP ve yoğunluk değerlerinin bitüm oranlarına bağlı olarak değişimlerini gösteren grafikler çizilerek Şekil 8.22'de verilmiştir.



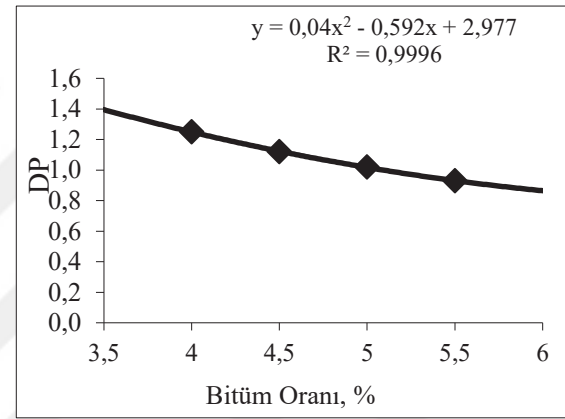
a) Bitüm oranı-boşluk oranı değişimi



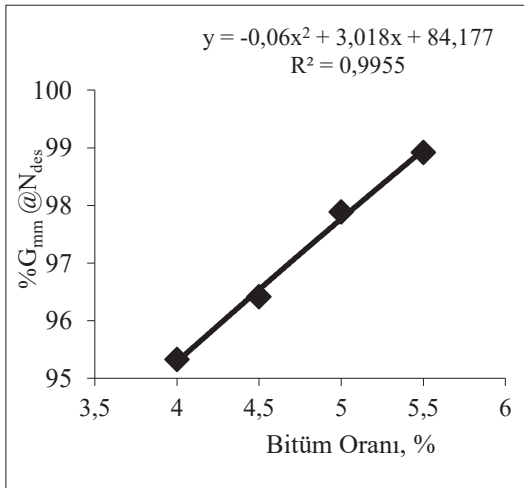
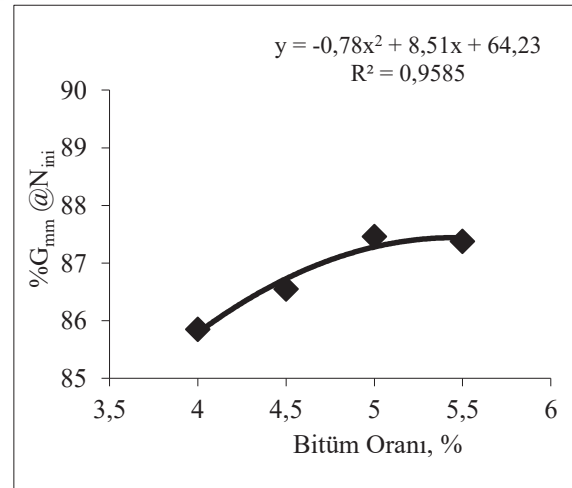
b) Bitüm oranı-VMA değişimi



c) Bitüm oranı-VFA değişimi



d) Bitüm oranı-DP değişimi

e) Bitüm oranı-%G_{mm}@N_{des} değişimif) Bitüm oranı-%G_{mm}@N_{ini} değişimi

Şekil 8.22. Normal bitüm BSK numunelerinin hacimsel ve yoğunluk özelliklerinin bitüm oranı ile değişimi

BSK numunelerinin hava boşluğu yüzdesi-bitüm oranı grafiği yardımıyla, boşluk %4 olacak şekilde bitüm oranı **%4,28** olarak tespit edilmiştir. Bu tasarım bitüm oranına

göre, grafikler yardımıyla diğer tasarım değerleri tespit edilerek sonuçları Çizelge 8.29’da verilmiş ve Superpave şartname kriterleri ile karşılaştırılmıştır.

Çizelge 8.29. Karışımın %4,28 tasarım bitüm içeriğindeki özellikleri

Karışım özelliği	Sonuç	Şartname kriteri
Hava boşluğu yüzdesi (V)	%4,0	%4,0
Agregalar arası boşluk yüzdesi (VMA)	14,10	Min. %14,0
Bitümle dolu boşluk yüzdesi (VFA)	71,67	%65-75
Toz oranı (DP)	1,17	0,6-1,6
%G _{mm} @N _{ini} =9	86,4	Maks. %89,0
%G _{mm} @N _{des} =139	%96,0	%96,0

8.2.2.2. NMS modifiye bitüm Superpave BSK deneyleri

Her bir bitüm oranı için BSK’nın gevşek haldeki maksimum teorik özgül ağırlık (G_{mm}) ve sıkışmış hacim özgül ağırlık (G_{mb}) değerleri belirlenerek Çizelge 8.30’da gösterilmiştir.

Çizelge 8.30. NMS modifiye bitüm BSK numuneleri fiziksel özellikleri

Bitüm oranı	W _b	Numune-1				Numune-2				G _{mm}
		A (kuru)	B (YKSD)	C (sudaki)	G _{mb} (ölç.)	A (kuru)	B (YKSD)	C (suda)	G _{mb} (ölç.)	
(%)	(g)	(g)	(g)	(g)	(g/cm ³)	(g)	(g)	(g)	(g/cm ³)	(g/cm ³)
3,97	45,65	1185,4	1194,3	702,6	2,411	1187,2	1193,6	700,0	2,405	2,522
4,47	51,41	1184,6	1190,3	704,8	2,440	1196,1	1204,5	706,3	2,401	2,514
4,97	57,16	1193,0	1196,5	711,9	2,462	1197,2	1201,2	714,9	2,462	2,509
5,47	62,91	1200,7	1202,4	717,1	2,474	1202,6	1206,4	717,5	2,460	2,500

Seçilen tasarım agrega gradasyonunda, %3,97; %4,47; %4,97 ve %5,47 NMS modifiye bitüm içeriklerinde hazırlanan BSK numuneleri yoğurmalı sıkıştırıcı ile sıkıştırılmıştır. BSK numunelerine ait sıkıştırma karakteristikleri Çizelge 8.31-8.34’de verilmiştir.

Çizelge 8.33. NMS modifiye bitüm BSK %4,97 bitüm oranı sıkıştırma karakteristikleri

Devir Sayısı	NMS4971		W _m =1193,0 g		NMS4972		W _m =1197,2 g		Ortalama G _{mm}
	H	G _{mb} (tah)	G _{mb} (düz.)	G _{mm}	H	G _{mb} (tah)	G _{mb} (düz.)	G _{mm}	
	(mm)	(g/cm ³)	(g/cm ³)	(%)	(mm)	(g/cm ³)	(g/cm ³)	(%)	
9	72,2	2,105	2,193	87,40	71,6	2,130	2,194	87,44	87,42
20	69,4	2,190	2,282	90,95	68,9	2,213	2,280	90,87	90,91
50	66,8	2,275	2,370	94,46	66,2	2,304	2,373	94,58	94,52
100	65,0	2,338	2,436	97,09	64,5	2,364	2,435	97,05	97,07
139	64,3	2,363	2,462	98,13	63,8	2,390	2,462	98,13	98,13
G _{mb} (ölçülen)		2,462			2,462				
Düz. Faktörü C		1,0419			1,0301				
G _{mm} (ölçülen)		2,509							

Çizelge 8.34. NMS modifiye bitüm BSK %5,47 bitüm oranı sıkıştırma karakteristikleri

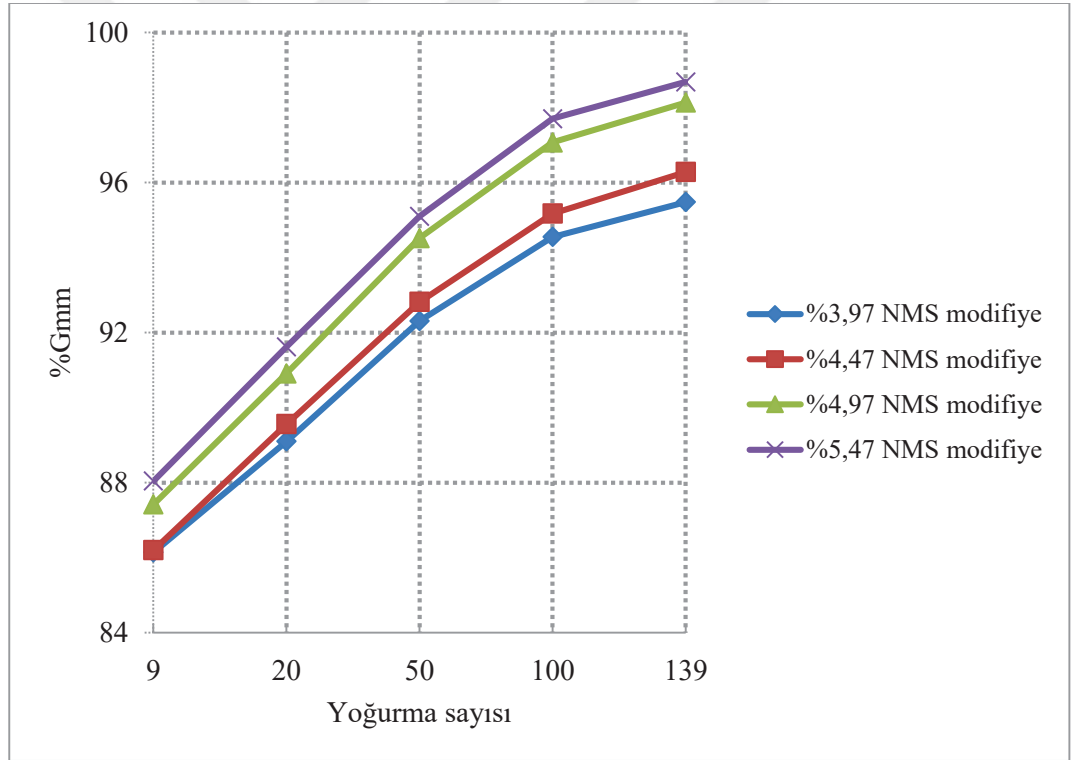
Devir Sayısı	NMS5471		W _m =1200,7 g		NMS5472		W _m =1202,6 g		Ortalama G _{mm}
	H	G _{mb} (tah)	G _{mb} (düz.)	G _{mm}	H	G _{mb} (tah)	G _{mb} (düz.)	G _{mm}	
	(mm)	(g/cm ³)	(g/cm ³)	(%)	(mm)	(g/cm ³)	(g/cm ³)	(%)	
9	71,6	2,136	2,201	88,04	71,9	2,131	2,201	88,04	88,04
20	68,6	2,230	2,298	91,92	69,3	2,211	2,283	91,32	91,62
50	66,0	2,317	2,387	95,48	66,8	2,293	2,368	94,72	95,10
100	64,3	2,379	2,451	98,04	65,0	2,357	2,434	97,36	97,70
139	63,7	2,401	2,474	98,96	64,3	2,382	2,460	98,40	98,68
G _{mb} (ölçülen)		2,474			2,460				
Düz. Faktörü C		1,0304			1,0327				
G _{mm} (ölçülen)		2,500							

NMS modifiye bitüm ile %3,97; %4,47; %4,97 ve %5,47 bitüm içeriklerinde hazırlanan BSK numunelerinin stabilite ve akma değerleri Çizelge 8.35’de gösterilmiştir.

Çizelge 8.35. NMS modifiye bitüm BSK numuneleri stabilite-akma değerleri

Numune no	Bitüm %	MS düzeltilmiş (kg)	Ortalama MS (kg)	Akma (mm)
NMS 3972	3,97	2228	2063	2,68
NMS 3973	3,97	1898		3,82
NMS 4471	4,47	2077	1914	2,71
NMS 4472	4,47	1751		2,86
NMS 4971	4,97	1821	1879	2,93
NMS 4972	4,97	1937		3,31
NMS 5471	5,47	1833	1734	3,70
NMS 5472	5,47	1634		3,84

NMS modifiye bitüm ile %3,97; %4,47; %4,97 ve %5,47 bitüm içeriklerinde hazırlanan BSK numunelerinin ortalama yoğunluk eğrileri Şekil 8.23’de gösterilmiştir.



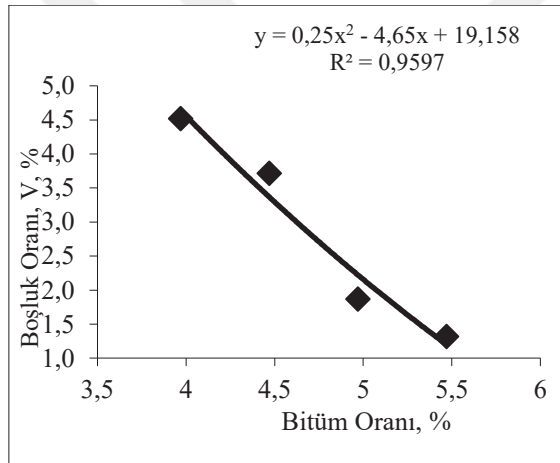
Şekil 8.23. NMS bitüm BSK numuneleri ortalama yoğunluk eğrileri

NMS modifiye bitüm ile hazırlanan BSK numunelerinin hacim özellikleri ve yoğunluk değerlerinin gösterildiği özet Çizelge 8.36’da verilmiştir.

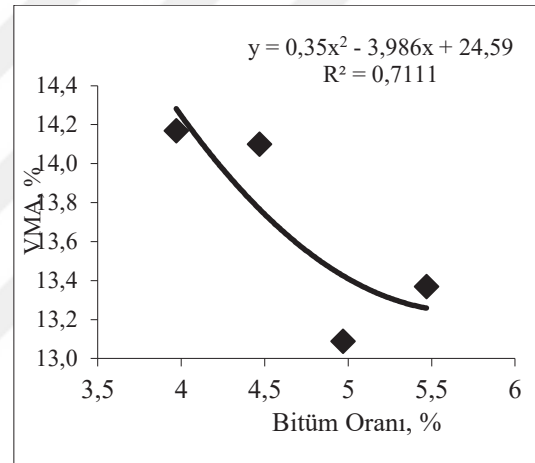
Çizelge 8.36. NMS modifiye bitüm ile hazırlanan BSK numunelerinin hacim özellikleri ve yoğunluk değerleri

Bitüm tipi ve oranı	%G _{mm} @N _{ini}	%G _{mm} @N _{des}	% V	% VMA	% VFA	DP
% 3,97 NMS	86,14	95,48	4,52	14,17	68,1	1,22
% 4,47 NMS	86,20	96,28	3,72	14,10	73,6	1,09
% 4,97 NMS	87,42	98,13	1,87	13,09	85,7	1,00
% 5,47 NMS	88,04	98,68	1,32	13,37	90,1	0,88

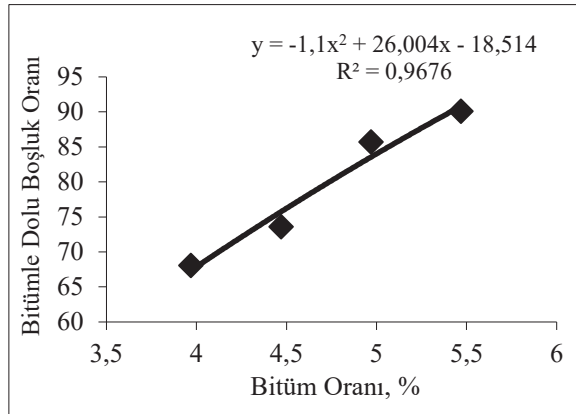
NMS modifiye bitüm ile hazırlanan BSK numunelerinin tasarım yoğurma sayısındaki V, VMA, VFA, DP ve yoğunluk değerlerinin bitüm oranlarına bağlı olarak değişimlerini gösteren grafikler çizilerek Şekil 8.24’de verilmiştir.



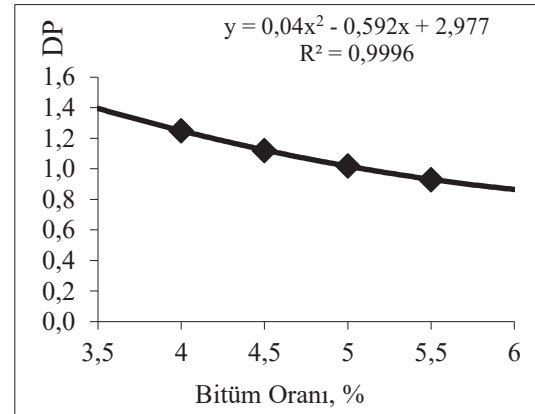
a) Bitüm oranı-boşluk oranı değişimi



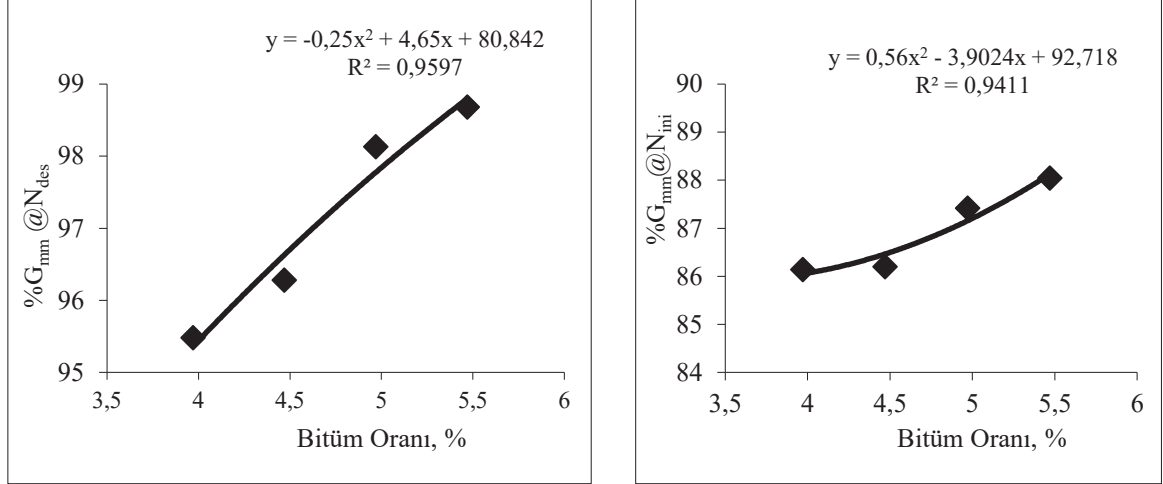
b) Bitüm oranı-VMA değişimi



c) Bitüm oranı-VFA değişimi



d) Bitüm oranı-DP değişimi

e) Bitüm oranı-%G_{mm}@N_{des} değişimif) Bitüm oranı-%G_{mm}@N_{ini} değişimi

Şekil 8.24. NMS bitüm BSK numunelerinin hacimsel ve yoğunluk özelliklerinin bitüm oranı ile değişimi

BSK numunelerinin hava boşluğu yüzdesi-bitüm oranı grafiği yardımıyla, boşluk %4 olacak şekilde bitüm oranı **%4,21** olarak tespit edilmiştir. Bu tasarım bitüm oranına göre, grafikler yardımıyla diğer tasarım değerleri tespit edilerek sonuçları Çizelge 8.37’de verilmiş ve Superpave şartname kriterleri ile karşılaştırılmıştır.

Çizelge 8.37. Karışımın %4,21 tasarım bitüm içeriğindeki özellikleri

Karışım özelliği	Sonuç	Şartname kriteri
Hava boşluğu yüzdesi(V)	%4,0	%4,0
Agregalar arası boşluk yüzdesi (VMA)	14,01	Min. %14,0
Bitümle dolu boşluk yüzdesi (VFA)	71,5	%65-75
Toz oranı (DP)	1,15	0,6-1,2
%G _{mm} @N _{ini} =9	%86,3	Maks. %89,0
%G _{mm} @N _{des} =139	%96,0	%96,0

Çizelge 8.40. NK modifiye bitüm BSK %4,60 bitüm oranı sıkıştırma karakteristikleri

Devir Sayısı	NK4601		W _m =1193,2 g		NK4602		W _m =1194,8 g		Ortalama G _{mm}
	H	G _{mb} (tah)	G _{mb} (düz.)	G _{mm}	H	G _{mb} (tah)	G _{mb} (düz.)	G _{mm}	
	(mm)	(g/cm ³)	(g/cm ³)	(%)	(mm)	(g/cm ³)	(g/cm ³)	(%)	
9	73,6	2,065	2,148	86,72	73,7	2,065	2,164	87,36	87,04
20	70,9	2,144	2,230	90,03	71,0	2,144	2,246	90,67	90,35
50	68,2	2,229	2,318	93,58	68,4	2,225	2,331	94,11	93,85
100	66,6	2,282	2,373	95,80	66,7	2,282	2,391	96,53	96,17
139	66,1	2,300	2,392	96,57	66,2	2,299	2,409	97,25	96,91
G _{mb} (ölçülen)			2,392				2,409		
Düz. Faktörü C			1,040				1,0478		
G _{mm} (ölçülen)				2,477					

Çizelge 8.41. NK modifiye bitüm BSK %5,10 bitüm oranı sıkıştırma karakteristikleri

Devir Sayısı	NK5101		W _m =1197,0 g		NK5102		W _m =1196,8 g		Ortalama G _{mm}
	H	G _{mb} (tah)	G _{mb} (düz.)	G _{mm}	H	G _{mb} (tah)	G _{mb} (düz.)	G _{mm}	
	(mm)	(g/cm ³)	(g/cm ³)	(%)	(mm)	(g/cm ³)	(g/cm ³)	(%)	
9	73,0	2,089	2,177	88,03	72,8	2,094	2,190	88,56	88,30
20	70,4	2,166	2,257	91,27	70,1	2,175	2,275	91,99	91,63
50	67,7	2,252	2,347	94,90	67,5	2,259	2,362	95,51	95,21
100	66,0	2,310	2,407	97,33	65,9	2,313	2,419	97,82	97,58
139	65,5	2,328	2,426	98,10	65,2	2,338	2,445	98,87	98,49
G _{mb} (ölçülen)			2,426				2,445		
Düz. Faktörü C			1,042				1,0458		
G _{mm} (ölçülen)				2,473					

NK modifiye bitüm ile %4,10; %4,60; %5,10 ve %5,60 bitüm içeriklerinde hazırlanan BSK numunelerinin stabilite ve akma değerleri Çizelge 8.43’de gösterilmiştir.

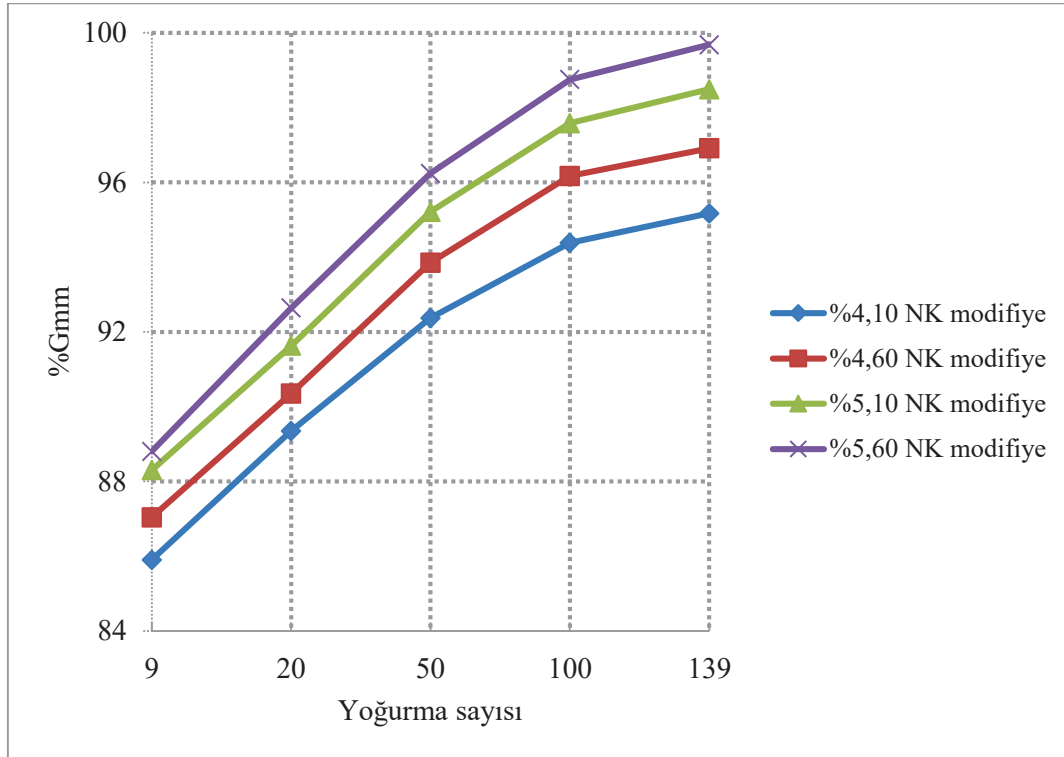
Çizelge 8.42. NK modifiye bitüm BSK %5,60 bitüm oranı sıkıştırma karakteristikleri

Devir Sayısı	NK5601		W _m =1201,9 g		NK5602		W _m =1202,7 g		Ortalama Gmm
	H	G _{mb} (tah)	G _{mb} (düz.)	G _{mm}	H	G mb (tah)	G mb (düz.)	G mm	
	(mm)	(g/cm ³)	(g/cm ³)	(%)	(mm)	(g/cm ³)	(g/cm ³)	(%)	
9	72,7	2,106	2,187	88,47	71,8	2,134	2,203	89,12	88,80
20	69,8	2,194	2,278	92,15	68,7	2,230	2,302	93,12	92,64
50	67,0	2,285	2,372	95,95	66,3	2,311	2,386	96,52	96,24
100	65,1	2,352	2,442	98,79	64,8	2,364	2,440	98,70	98,75
139	64,4	2,377	2,468	99,84	64,3	2,383	2,460	99,51	99,68
Gmb (ölçülen)		2,468			2,460				
Düz. Faktörü C		1,0383			1,0323				
Gmm (ölçülen)		2,472							

Çizelge 8.43. NK modifiye bitüm BSK numuneleri stabilite-akma değerleri

Numune no	Bitüm %	MS düzeltilmiş (kg)	Ortalama MS (kg)	Akma (mm)
NK 4107	4,10	1431	1202	3,56
NK 4108	4,10	974		3,02
NK 4601	4,60	1516	1521	2,55
NK 4602	4,60	1526		2,24
NK 5101	5,10	1462	1488	2,93
NK 5102	5,10	1514		3,79
NK 5601	5,60	1584	1374	3,51
NK 5602	5,60	1163		5,04

NK modifiye bitüm ile %4,10; %4,60; %5,10 ve %5,60 bitüm içeriklerinde hazırlanan BSK numunelerinin ortalama yoğunluk eğrileri Şekil 8.25’de gösterilmiştir.



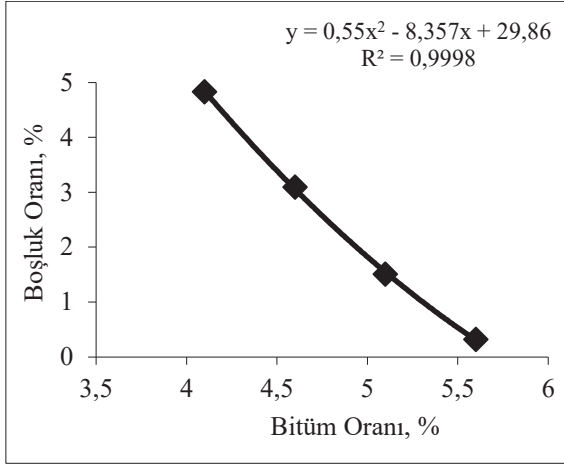
Şekil 8.25. NK bitüm BSK numuneleri ortalama yoğunluk eğrileri

NK modifiye bitüm ile hazırlanan BSK numunelerinin hacim özellikleri ve yoğunluk değerlerinin gösterildiği özet Çizelge 8.44’de verilmiştir.

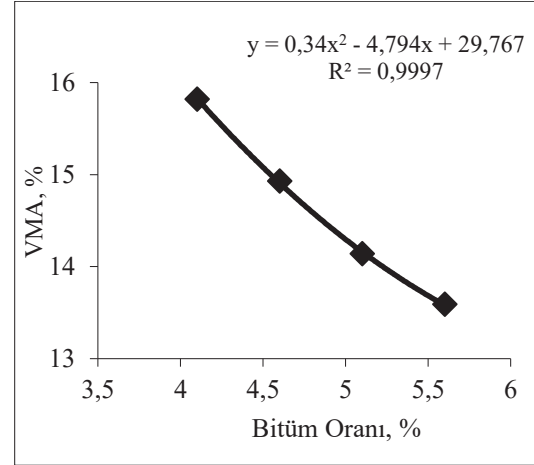
Çizelge 8.44. NK modifiye bitüm ile hazırlanan BSK numunelerinin hacim özellikleri ve yoğunluk değerleri

Bitüm tipi ve oranı	%G _{mm} @N _{ini}	%G _{mm} @N _{des}	% V	% VMA	% VFA	DP
%4,10 NK	85,90	95,17	4,83	15,82	69,5	1,19
%4,60 NK	87,04	96,91	3,09	14,93	79,3	1,10
%5,10 NK	88,30	98,49	1,51	14,14	89,3	0,99
%5,60 NK	88,80	99,68	0,32	13,59	97,6	0,87

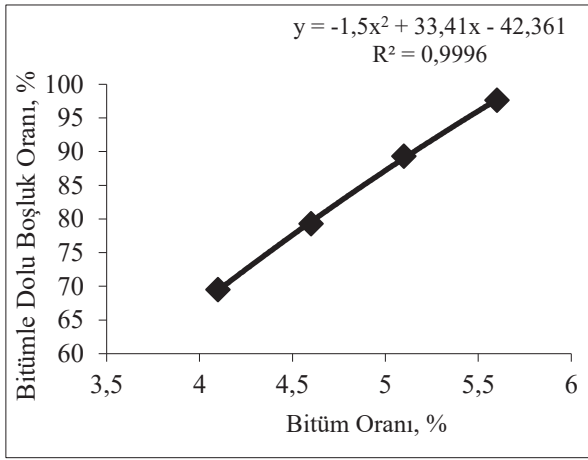
NMS modifiye bitüm ile hazırlanan BSK numunelerinin tasarım yoğurma sayısındaki V, VMA, VFA, DP ve yoğunluk değerlerinin bitüm oranlarına bağlı olarak değişimlerini gösteren grafikler çizilerek Şekil 8.26’da verilmiştir.



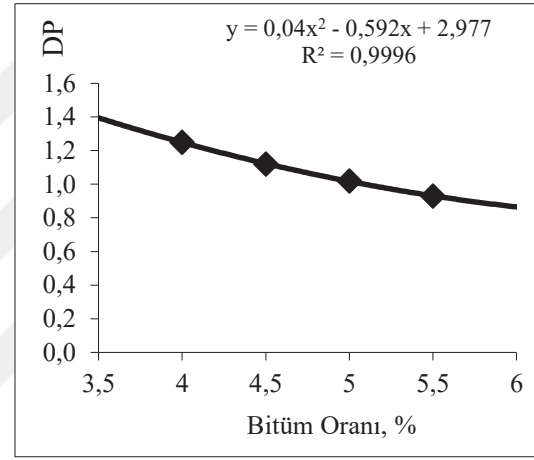
a) Bitüm oranı-boşluk oranı değişimi



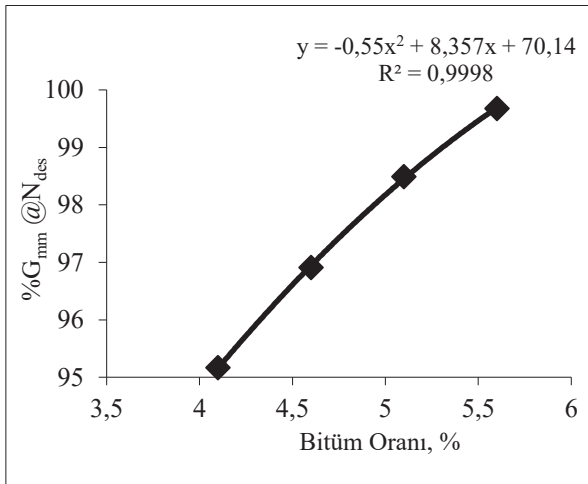
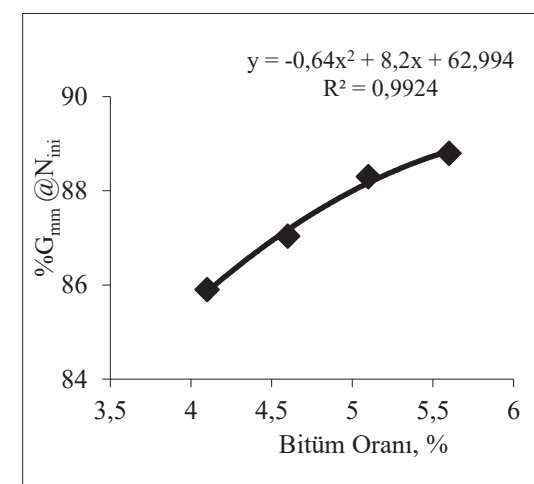
b) Bitüm oranı-VMA değişimi



c) Bitüm oranı-VFA değişimi



d) Bitüm oranı-DP değişimi

e) Bitüm oranı-%G_{mm}@N_{des} değişimif) Bitüm oranı-%G_{mm}@N_{ini} değişimi

Şekil 8.26. NK bitüm BSK numunelerinin hacimsel ve yoğunluk özelliklerinin bitüm oranı ile değişimi

BSK numunelerinin hava boşluğu yüzdesi-bitüm oranı grafiği yardımıyla, boşluk %4 olacak şekilde bitüm oranı **%4,33** olarak tespit edilmiştir. Bu tasarım bitüm oranına göre, grafikler yardımıyla diğer tasarım değerleri tespit edilerek sonuçları Çizelge 8.45’de verilmiş ve Superpave şartname kriterleri ile karşılaştırılmıştır.

Çizelge 8.45. Karışımın %4,33 tasarım bitüm içeriğindeki özellikleri

Karışım özelliği	Sonuç	Şartname kriteri
Hava boşluğu yüzdesi (V)	%4,0	%4,0
Agregalar arası boşluk yüzdesi (VMA)	15,38	Min. %14,0
Bitümle dolu boşluk yüzdesi (VFA)	74,18	%65-75
Toz oranı (DP)	1,15	0,6-1,2
%G _{mm} @N _{ini} =9	%86,5	Maks. %89,0
%G _{mm} @N _{des} =139	%96,0	%96,0

8.2.2.4. Superpave denevi toplu sonuçları

Superpave yöntemine göre normal, NMS ve NK katkılı BSK numuneleri için optimum bitüm oranları sırasıyla, %4,28; %4,21 ve %4,33 olarak tespit edilmiştir.

8.2.3. İndirekt çekme mukavemeti (ITS) deney sonuçları

Superpave tasarımına göre hazırlanmış BSK numunelerinin performans özelliklerinin tespit edilebilmesi amacıyla İndirekt Çekme Mukavemeti (ITS) ve nem hassasiyeti (AASHTO T 283) deneyleri yapılmıştır.

BSK numunelerinin nem hassasiyetini AASHTO T 283 yöntemine göre tespit edebilmek amacıyla, normal, NMS ve NK modifiye bitüm ile her karışım tipi için 3 adet kuru ve 3 adet şartlandırılmış olmak üzere 6 adet, toplamda 18 adet numune hazırlanmıştır. AASHTO T 283’e göre sıkıştırılan numunelerde boşluk oranının %6,5-7,5 arasında olması gerekmektedir.

Deneyde optimum bitüm içeriğinde hazırlanan gevşek BSK numuneleri tepsilere konmuş, oda sıcaklığında 2 saat soğutulduktan sonra 60°C’deki etüvde 16 saat bekletilerek yaşlandırılmıştır. Sonrasında gevşek karışım numuneleri sıkıştırma öncesinde 2 saat etüvde

sıkıştırma sıcaklığında bekletilmiştir. Yeterli hava boşluğu oranının sağlanabilmesi amacıyla her yüze 25 darbe vurmak suretiyle Marshall yöntemine göre sıkıştırılan numuneler deneye tabi tutulmadan önce oda sıcaklığında 24 saat bekletilmiştir.

Sıkıştırılan numunelerin havadaki kuru (A), yüzey kuru suya doymuş (B) ve sudaki (C) ağırlıkları tespit edilerek fiziksel özellikleri belirlenmiştir. Deneye tabi tutulacak şartlandırılmamış (kuru) ve şartlandırılmış (yaş) numunelerin fiziksel özellikleri sırasıyla Çizelge 8.46 ve Çizelge 8.47’de verilmiştir.

Çizelge 8.46. Şartlandırılmamış (kuru) numunelerin fiziksel özellikleri

BSK Tipi	Numune no	Yükseklik	A	B	C	Gmb	Gmm	V	VMA	VFA
		(mm)	(g)	(g)	(g)	(g/cm ³)	(g/cm ³)	(%)	(%)	(%)
Normal	1	66,8	1195,9	1209,2	695,1	2,326	2,512	7,40	13,63	45,71
	2	67,0	1196,3	1210,7	696,6	2,327	2,512	7,36	13,60	45,88
	3	67,3	1196,4	1210,5	698,0	2,334	2,512	7,09	13,34	46,85
	Ortalama					2,329	2,512	7,28	13,52	46,15
% 5 NMS	1	66,9	1197,2	1211,2	697,7	2,331	2,514	7,28	13,45	45,87
	2	68,1	1198,1	1211,8	698,2	2,333	2,514	7,20	13,37	46,15
	3	66,8	1196,9	1210,7	697,9	2,334	2,514	7,16	13,34	46,33
	Ortalama					2,333	2,514	7,21	13,39	46,12
%5 NK	1	66,8	1197,1	1211,5	694,0	2,313	2,477	6,62	14,12	53,12
	2	67,4	1195,1	1210,7	693,3	2,310	2,477	6,74	14,23	52,63
	3	66,8	1198,1	1212,0	694,2	2,314	2,477	6,58	14,08	53,27
	Ortalama					2,312	2,477	6,65	14,14	53,01

Numunelerin fiziksel özellikleri tespit edildikten sonra şartlandırılmayacak numuneler 25°C’deki su banyosunda 2 saat bekletildikten sonra İndirekt Çekme Mukavemeti deney cihazında yüke maruz bırakılmış, numunelerin kırıldığı maksimum yük tespit edilmiş ve indirekt çekme mukavemetleri (ITS_{kuru}) hesaplanmıştır.

Şartlandırılacak numunelere 13-67 kPa emme basıncı altında 10 dakika süre ile manometre yardımıyla vakum uygulanarak %70-80 oranında su ile doymuş hale gelmesi sağlanmıştır. BSK numunelerinin doymuşluk dereceleri Çizelge 8.48’de verilmiştir.

Çizelge 8.47. Şartlandırılmış (yaş) numunelerin fiziksel özellikleri

BSK Tipi	Numune no	Yükseklik (mm)	A (g)	B (g)	C (g)	Gmb (g/cm ³)	Gmm (g/cm ³)	V (%)	VMA (%)	VFA (%)
Normal	1	69,1	1194,8	1208,0	696,5	2,336	2,512	7,01	13,26	47,13
	2	69,3	1195,3	1208,6	696,7	2,335	2,512	7,05	13,30	46,99
	3	69,0	1194,7	1207,4	696,8	2,340	2,512	6,85	13,11	47,75
	Ortalama					2,337	2,512	6,97	13,22	47,29
% 5 NMS	1	68,9	1197,4	1210,2	698,0	2,338	2,514	7,00	13,19	46,93
	2	70,1	1195,7	1208,9	699,7	2,348	2,514	6,61	12,82	48,44
	3	68,1	1196,4	1209,1	698,5	2,343	2,514	6,79	13,00	47,77
	Ortalama					2,343	2,514	6,80	13,00	47,71
%5 NK	1	71,2	1197,2	1209,7	692,5	2,315	2,477	6,54	14,04	53,42
	2	69,2	1196,8	1208,3	691,1	2,314	2,477	6,58	14,08	53,27
	3	71,5	1195,9	1208,6	691,3	2,312	2,477	6,66	14,15	52,93
	Ortalama					2,314	2,477	6,59	14,09	53,21

Çizelge 8.48. Şartlandırılan BSK numunelerinin doygunluk dereceleri

BSK Tipi	Numune no	Şartlandırmadan Önce						Şartlandırmadan Sonra		
		A (kuru)	B (doygun)	C (suda)	V (hacim)	V	V	B1 (doygun)	V su	D doygun
		(g)	(g)	(g)	(cm ³)	(%)	(cm ³)	(g)	(cm ³)	(%)
Normal	1	1194,8	1208,0	696,5	511,5	7,01	35,86	1221,4	26,58	74,12
	2	1195,3	1208,6	696,7	511,9	7,05	36,09	1222,3	26,98	74,77
	3	1194,7	1207,4	696,8	510,6	6,85	34,98	1220,5	25,78	73,69
	Ortalama									74,19
% 5 NMS	1	1197,4	1210,2	698,0	512,2	7,00	35,85	1223,9	26,54	74,02
	2	1195,7	1208,9	699,7	509,2	6,61	33,66	1220,6	24,90	73,98
	3	1196,4	1209,1	698,5	510,6	6,79	34,67	1222,0	25,59	73,80
	Ortalama									73,93
% 5 NK	1	1197,2	1209,7	692,5	517,2	6,54	33,82	1221,9	24,66	72,93
	2	1196,8	1208,3	691,1	517,0	6,58	34,02	1221,6	24,85	73,04
	3	1195,9	1208,6	691,3	517,3	6,66	34,45	1221,1	25,19	73,11
	Ortalama									73,03

Doygun hale getirilen numuneler, 16 saat süre ile -18°C’de dondurucuda bekletilmiştir. Dondurucudan çıkartılan numuneler 60°C’deki su banyosunda 24 saat bekletildikten sonra, 25°C’deki su banyosunda 2 saat bekletilmiş ve sonrasında deneye tabi tutulmuştur. Numunelerin kırıldığı maksimum yük tespit edilerek indirekt çekme mukavemetleri (ITS_{yaş}) hesaplanmıştır.

Şartlandırılmış yaş numunelerin indirekt çekme mukavemetleri (ITS_{yaş}), şartlandırılmayan (kuru) numunelerin indirekt çekme mukavemetine (ITS_{yaş}) bölünerek,

nem hassasiyetinin bir ölçüsü olan indirekt çekme mukavemeti oranları (ITSR) tespit edilmiş ve sonuçları Çizelge 8.49’da verilmiştir.

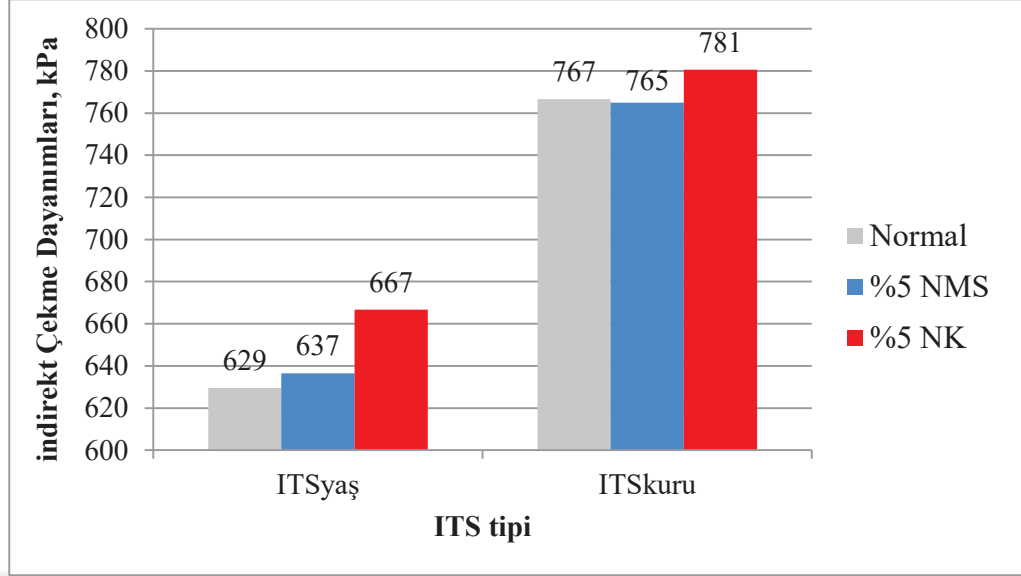
Çizelge 8.49. İndirekt çekme mukavemeti oranları (ITSR)

BSK Tipi	Numune no	Şartlandırılmış numuneler			Kuru numuneler			ITSR
		Yükseklik	Pmaks	ITS _{yaş}	Yükseklik	Pmaks	ITS _{kuru}	
		(mm)	(kN)	(kPa)	(mm)	(kN)	(kPa)	(%)
Normal	1	69,1	7,03	638,11	66,8	8,85	830,56	82,10
	2	69,3	7,15	646,65	67,0	7,83	732,60	
	3	69,0	6,64	603,53	67,3	7,91	736,83	
	Ortalama		6,94	629,43		8,20	766,66	
%5 NMS	1	68,9	7,21	655,78	66,9	8,12	760,92	83,22
	2	70,1	7,29	652,09	68,1	8,76	806,42	
	3	68,1	6,54	601,75	66,8	7,75	727,33	
	Ortalama		7,01	636,54		8,21	764,89	
%5 NK	1	71,2	7,89	695,04	66,8	8,76	822,12	85,41
	2	69,2	7,47	677,17	67,4	7,71	717,13	
	3	71,5	7,16	627,80	66,8	8,55	802,41	
	Ortalama		7,51	666,67		8,34	780,55	

İndirekt çekme dayanımı deney sonuçlarına göre, şartlandırılmamış numuneler için; normal ve NMS modifiye bitüm ile hazırlanan BSK numunelerinin ortalama indirekt çekme dayanımları yaklaşık olarak aynı değerdedir. NK modifiye BSK numunelerinin ortalama indirekt çekme dayanımları normal numunelere göre %2 daha yüksektir. Normal, NMS ve NK modifiye bitüm ile hazırlanan BSK numuneleri için ITS_{yaş} ve ITS_{kuru} değerlerinin BSK tipine göre değişimi Şekil 8.27’de verilmiştir.

Şartlandırılmış numuneler için; her iki katkı ile bitümün modifiyesi neticesinde normal bitüm BSK numunelerine kıyasla numunelerin nem dayanımı artmaktadır. Nem dayanımı açısından en iyi sonucu NK modifiye bitüm ile hazırlanan BSK numuneleri vermektedir. Normal bitüm BSK numunelerine kıyasla ortalama nem dayanımları %6 daha yüksektir.

Normal, NMS ve NK modifiye bitüm BSK numuneleri indirekt çekme mukavemeti oranları (ITSR) %80’in üzerinde olduğundan, numunelerin nem dayanımının yeterli düzeyde olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 8.27. BSK numune tiplerine göre ITS_{yaş}-ITS_{kuru} değişimi

8.2.4. Karışımların maliyet hesabı

Bitüm ve bitümlü karışımların modifiyesinde kullanılacak katkı malzemelerinin tercih edilebilir olması için, performans açısından sağladığı faydaların yanında kolay elde edilebilir ve maliyetlerinin uygun olması oldukça önemlidir.

2018 yılı Nisan ayı için 50 /70 penetrasyon bitüm TÜPRAŞ rafineri ton fiyatı 1660 TL'dir. Normal bitüm, NMS ve NK modifiye bitümler için optimum bitüm oranları sırasıyla %4,50; %4,47 ve %4,60'dır. Bu bağlamda belirtilen oranlarda bitüm kullanılarak bir ton aşınma tipi BSK hazırlamak için gerekli bitüm maliyeti;

Normal bitüm için : $1660 * 4,50 / 100 = 74,7$ TL

Modifiye bitüm üretimi için gerekli katkı maliyetleri ile ilgili olarak; piyasada öğütülmemiş Mg spinel ve kolemanit ton fiyatları sırasıyla 1000\$ ve 400 \$'dır.

2018 yılı Nisan ayı için 1\$= 4,10 TL olup,

Mg spinel ton fiyatı : $1000 * 4,10 = 4100$ TL

Kolemanit ton fiyatı : $400 * 4,10 = 1640$ TL

Her iki katkı için de deneysel çalışmalar ile belirlenen optimum katkı oranının %5 olduğu değerlendirildiğinde;

%5 katkı oranında 1 ton modifiye bitüm maliyetleri;

Mg spinel için : $[1660 * (100-5) + 4100 * 5] / 100 = 1782$ TL/ton

Kolemanit için : $[1660 * (100-95) + 1640 * 5] / 100 = 1659$ TL/ton'dur.

Modifiye bitümlerin 1 ton karışım içerisindeki bedeli:

Mg spinel için : $1782 * 4,47 / 100 = 79,6$ TL

Kolemanit için : $1659 * 4,60 / 100 = 76,3$ TL

Bu bağlamda her iki katkı ile modifiye işlemi neticesinde 1 ton aşınma tipi BSK üretmek için gerekli bitüm maliyetlerinde normal bitüme kıyasla artış oluşmaktadır. %5 NMS ve NK modifiye bitüm kullanıldığı takdirde, normal bitüme kıyasla ton başına sırasıyla 4,9 ve 1,6 TL fazla harcama yapmak gerekmektedir. NMS ve NK bitüm için maliyetlerdeki artış ton başına sırasıyla %6,5 ve %2,1'dir.

Çalışma kapsamında 3 boyutlu çalkalama ile spex 8000 tipindeki bilyalı değirmende katkı maddeleri nano boyuta indirgenmiş olup, değirmenlerin laboratuvar ölçekli olması sebebiyle öğütme işlemi maliyet analizinde dikkate alınmamıştır. Pilot veya endüstriyel ölçekteki değirmenlerde maliyeti hesaplamak daha gerçekçi olacaktır.

Piyasada BSK'larda performans artırıcı olarak kullanılan katkıların maliyetleri ile kıyaslama yapılabilmesi açısından; termoplastik elastomer tipi SBS katkı ton fiyatı yaklaşık 3000 \$ olup, bitüm ağırlığınca %4-5 oranlarında uygulanmaktadır. Söz konusu katkı; aşınma tipi asfalt beton maliyetlerinde ton başına ortalama %12-13 artış oluşturmaktadır.

Sonuç olarak, tez çalışması kapsamında kullanılan her iki katkı BSK'nın özellikle sıcak iklim performansını önemli ölçüde iyileştirmektedir. Her iki katkı da ticari olarak satılan katkılara göre maliyet açısından avantajlı olup, BSK ton maliyetlerinde oldukça düşük maliyet artışları getirmektedir.

8.2.5. Marshall numune sonuçları için çokdeğişkenli varyans analizi (MANOVA)

MS (Marshall stabilite), PÖA (Pratik özgül ağırlık), BO (Boşluk oranı) ve BDBO (Bitümle dolu boşluk oranı) bağımlı değişkenler; bitüm oranı ise bağımsız değişken olmak üzere, BSK numunelerinin Marshall tasarımına göre hazırlanmasında kullanılan %3,5-6,5 arasındaki bitüm oranlarının bağımlı değişkenler üzerindeki etkisinin incelenmesi amacıyla MANOVA analizinden yararlanılmıştır. Tez kapsamında Microsoft excel programı kullanılarak deney sonuçlarının değerlendirilmesi yapılmıştır. Bu sonuçları desteklemek amacıyla istatistiksel analiz ve modelleme de yapılmıştır.

8.2.5.1. Normal bitüm BSK numuneleri için MANOVA analizi

Normal bitüm ile hazırlanan BSK numuneleri Box-M testi sonuçları Çizelge 8.50’de verilmiş olup, Box-M testi varyans-kovaryans matrislerinin eşitliğini sınamaktadır. Bu test istatistiğine göre, varyans-kovaryans matrislerinin eşit olduğu sonucuna varılır ($p = \text{anlamlılık} > 0,05$).

Çizelge 8.50. Normal bitüm BSK numuneleri Box-M Testi sonuçları

Bitüm tipi	Box-M	p
Normal	18,819	0,553

Levene’s testi, varyansların ayrı ayrı eşitliğini sınamakta olup, normal bitüm BSK numuneleri Levene’s testi sonuçları Çizelge 8.51’de verilmiştir. Buna göre MS, PÖA, BO ve BDBO varyanslarının eşit olduğu görülmektedir ($p > 0,05$). Bu durum deney sonuçlarının tutarlı olduğunun bir göstergesidir.

Çizelge 8.51. Normal bitüm BSK numuneleri varyansların eşitliği için Levene's testi sonuçları

	F	sd1	sd2	p
MS	0,819	6	14	0,573
PÖA	1,061	6	14	0,430
BO	1,075	6	14	0,422
BDBO	0,932	6	14	0,502

Çokdeğişkenli test, grup ortalama vektörlerinin eşitliğini 4 farklı test ile sınamaktadır. Bunlardan en geçerli olanı Wilks’ Lambda testidir. Normal bitüm BSK

numuneleri çokdeğişkenli test sonuçları Çizelge 8.52’de verilmiş olup; buna göre, bitüm oranı için ortalama vektörlerin eşit olmadığı sonucuna varılır ($p < 0,05$). Etkilerin sınanmasına ilişkin sonuçlar ise Çizelge 8.53’de verilmiştir.

Çizelge 8.52. Normal bitüm BSK numuneleri çokdeğişkenli test sonuçları

Etki		Değeri	F	Hipotez sd	Hata sd	p
Bitüm Oranı	Pillai's Trace	2,704	4,869	24,000	56,000	0,000
	Wilks' Lambda	0,000	229,044	24,000	39,584	0,000
	Hotelling's Trace	509375,554	201627,824	24,000	38,000	0,000
	Roy's Largest Root	509359,253	1,189E6	6,000	14,000	0,000

Bu bağlamda, optimum bitüm oranının belirlenmesinde kullanılan BO, PÖA, MS, BDBO kriterleri için bitüm oranları yaklaşık aynıdır.

Çizelge 8.53. Normal bitüm BSK numuneleri için etkilerin sınanması

	Bağımlı Değişken	Kareler Toplamı	sd	Kareler Ortalaması	F	p
Bitüm Oranı	MS	1131134,163	6	188522,360	79,749	0,000
	PÖA	11382,767	6	1897,128	38,412	0,000
	BO	91,045	6	15,174	194,909	0,000
	BDBO	4717,965	6	786,328	277,853	0,000
Hata	MS	33095,440	14	2363,960		
	PÖA	691,453	14	49,390		
	BO	1,090	14	0,078		
	BDBO	39,620	14	2,830		
Toplam	MS	1164229,603	20			
	PÖA	12074,220	20			
	BO	92,135	20			
	BDBO	4757,585	20			

Bitüm oranındaki farklılığın MS, PÖA, BO ve BDBO değişkenleri üzerinde etkili olduğu tespit edilmiştir ($p < 0,05$).

Normal bitüm ile hazırlanan BSK numunelerinde bağımlı değişkenlerin bitüm oranına göre değişimi Ek.2’de verilen Çizelge 1’de gösterilmiştir. Buna göre, MS değişkeni için farklılığa neden olan bitüm oranı grupları: 3,5 ile 4,0 ve 3,5 ile 4,5 ve 3,5 ile 6,0 ve 3,5 ile 6,5 gruplarıdır ($p < 0,05$).

8.2.5.2. NMS modifiye bitüm BSK numuneleri için MANOVA analizi

NMS modifiye bitüm ile hazırlanan BSK numuneleri Box-M testi sonuçları Çizelge 8.54’de verilmiş olup, Box-M testi varyans-kovaryans matrislerinin eşitliğini sınamaktadır. Bu test istatistiğine göre, varyans-kovaryans matrislerinin eşit olduğu sonucuna varılır ($p > 0,05$).

Çizelge 8.54. NMS modifiye BSK numuneleri Box-M Testi sonuçları

Bitüm tipi	Box-M	p
NMS	23,819	0,258

Levene’s testi, varyansların ayrı ayrı eşitliğini sınamakta olup, NMS modifiye BSK numuneleri Levene’s testi sonuçları Çizelge 8.55’de verilmiştir. Buna göre MS, PÖA, BO ve BDBO varyanslarının eşit olduğu görülmektedir ($p > 0,05$).

Çizelge 8.55. NMS modifiye BSK numuneleri varyansların eşitliği için Levene's testi sonuçları

	F	sd1	sd2	p
MS	2,006	6	14	0,133
PÖA	1,651	6	14	0,206
BO	1,675	6	14	0,200
BDBO	2,554	6	14	0,102

NMS modifiye BSK numuneleri çokdeğişkenli test sonuçları Çizelge 8.56’da verilmiş olup; buna göre, bitüm oranı için ortalama vektörlerin eşit olmadığı sonucuna varılır ($p < 0,05$). Etkilerin sınanmasına ilişkin sonuçlar ise Çizelge 8.57’de verilmiştir.

Çizelge 8.56. NMS modifiye BSK numuneleri çokdeğişkenli test sonuçları

Etki		Değeri	F	Hipotez sd	Hata sd	p
Bitüm Oranı	Pillai's Trace	2,494	3,865	24,000	56,000	0,000
	Wilks' Lambda	0,000	160,835	24,000	39,584	0,000
	Hotelling's Trace	285881,554	113161,445	24,000	38,000	0,000
	Roy's Largest Root	285867,549	667024,070	6,000	14,000	0,000

Bu bağlamda, optimum bitüm oranının belirlenmesinde kullanılan BO, PÖA, MS, BDBO kriterleri için bitüm oranları yaklaşık aynıdır.

Çizelge 8.57. NMS modifiye BSK numuneleri için etkilerin sınanması

	Bağımlı Değişken	Kareler Toplamı	sd	Kareler Ortalaması	F	p
Bitüm Oranı	MS	903288,476	6	150548,079	41,491	0,000
	PÖA	13237,370	6	2206,228	44,088	0,000
	BO	100,612	6	16,769	213,470	0,000
	BDBO	5150,977	6	858,496	320,443	0,000
Hata	MS	50798,507	14	3628,465		
	PÖA	700,580	14	50,041		
	BO	1,100	14	0,079		
	BDBO	37,507	14	2,679		
Toplam	MS	954086,983	20			
	PÖA	13937,950	20			
	BO	101,711	20			
	BDBO	5188,484	20			

Bitüm oranındaki farklılığın MS, PÖA, BO ve BDBO değişkenleri üzerinde etkili olduğu tespit edilmiştir ($p < 0,05$).

NMS modifiye bitüm ile hazırlanan BSK numunelerinde bağımlı değişkenlerin bitüm oranına göre değişimi Ek.2’de verilen Çizelge 2’de gösterilmiştir. Buna göre MS değişkeni için farklılığa neden olan bitüm oranı grupları: 3,5 ile 5,5 ve 3,5 ile 6,0 ve 3,5 ile 6,5 gruplarıdır ($p < 0,05$).

8.2.5.3. NK modifiye bitüm BSK numuneleri için MANOVA analizi

NK modifiye bitüm ile hazırlanan BSK numuneleri Box-M testi sonuçları Çizelge 8.58’de verilmiş olup, Box-M testi varyans-kovaryans matrislerinin eşitliğini sınamaktadır. Bu test istatistiğine göre, varyans-kovaryans matrislerinin eşit olduğu sonucuna varılır ($p > 0,05$).

Çizelge 8.58. NK modifiye BSK numuneleri Box-M Testi sonuçları

Bitüm tipi	Box-M	p
NK	22,819	0,208

NK modifiye BSK numuneleri Levene's testi sonuçları Çizelge 8.59'da verilmiştir. Buna göre MS, PÖA, BO ve BDBO varyanslarının eşit olduğu görülmektedir ($p > 0,05$).

Çizelge 8.59. NK modifiye BSK numuneleri varyansların eşitliği için Levene's testi sonuçları

	F	sd1	sd2	p
MS	0,687	6	14	0,654
PÖA	2,615	6	14	0,065
BO	2,547	6	14	0,070
BDBO	2,601	6	14	0,066

NK modifiye BSK numuneleri çokdeğişkenli test sonuçları Çizelge 8.60'da verilmiş olup; buna göre, bitüm oranı için ortalama vektörlerin eşit olmadığı sonucuna varılır ($p < 0,05$). Etkilerin sınanmasına ilişkin sonuçlar ise Çizelge 8.61'de verilmiştir.

Çizelge 8.60. NK modifiye BSK numuneleri çokdeğişkenli test sonuçları

Etki		Değeri	F	Hipotez sd	Hata sd	p
Bitüm	Pillai's Trace	3,103	8,069	24,000	56,000	0,000
Oranı	Wilks' Lambda	0,000	251,099	24,000	39,584	0,000
	Hotelling's Trace	264608,777	104740,974	24,000	38,000	0,000
	Roy's Largest Root	264586,103	617367,574	6,000	14,000	0,000

Bu bağlamda, optimum bitüm oranının belirlenmesinde kullanılan BO, PÖA, MS, BDBO kriterleri için bitüm oranları yaklaşık aynıdır.

Bitüm oranındaki farklılığın MS, PÖA, BO ve BDBO değişkenleri üzerinde etkili olduğu tespit edilmiştir ($p < 0,05$).

NK modifiye bitüm ile hazırlanan BSK numunelerinde bağımlı değişkenlerin bitüm oranına göre değişimi Ek.2'de verilen Çizelge 3'de gösterilmiştir. Buna göre MS değişkeni için farklılığa neden olan NK katkılı Bitüm oranı grupları: 3,5 ile 6,0 ve 3,5 ile 6,5 gruplarıdır ($p < 0,05$).

Çizelge 8.61. NK modifiye BSK numuneleri için etkilerin sınanması

	Bağımlı Değişken	Kareler Toplamı	sd	Kareler Ortalaması	F	p
Bitüm Oranı	MS	964092,851	6	160682,142	45,037	0,000
	PÖA	11527,190	6	1921,198	85,009	0,000
	BO	99,517	6	16,586	460,422	0,000
	BDBO	4937,014	6	822,836	715,690	0,000
Hata	MS	49948,827	14	3567,773		
	PÖA	316,400	14	22,600		
	BO	0,504	14	0,036		
	BDBO	16,096	14	1,150		
Toplam	MS	1014041,678	20			
	PÖA	11843,590	20			
	BO	100,021	20			
	BDBO	4953,109	20			

8.2.5.4. Çokdeğişkenli regresyon analizi

Yapılan çok değişkenli regresyon analizi sonucunda elde edilen fonksiyonlar aşağıda verilmiştir. Burada Y1, Y2, Y3 ve Y4 bağımlı değişkenler, X ise bağımsız değişkendir.

X: Bitüm Oranı

Y1=MS

Y2=PÖA

Y3=BO

Y4=BBDO

Normal bitüm BSK numuneleri

2371,961	2360,864	12,37035	12,51456
-214,402	14,67444	-1,9124	13,74698

Y1=2371,961-214,402*X

Y2=2360,864+14,674*X

Y3=12,370-1,912*X

Y4=12,515+13,745*X

NMS modifiye BSK numuneleri

2495,629	2347,058	12,92592	9,040508
-210,415	17,99477	-2,04624	14,61254

$$Y1=2495,629-210,415*X$$

$$Y2=2347,058+17,995*X$$

$$Y3=12,926-2,045*X$$

$$Y4=9,041+14,613*X$$

NK modifiye BSK numuneleri

2311,124	2331,393	13,54805	5,656781
-189,735	20,1723	-2,13232	15,05293

$$Y1=2311,124-189,735*X$$

$$Y2=2331,393+20,172*X$$

$$Y3=13,548-2,132*X$$

$$Y4=5,657+15,053*X$$

8.2.6. Dönel viskozimetre deney sonuçları için MANOVA analizi

90-160 °C sıcaklık aralığında gerçekleştirilen viskozite deney sonuçları esas alınarak; sıcaklık, katkı türü ve oranının viskozite üzerindeki etkisinin incelenmesi amacıyla modelleme çalışması yapılmıştır. Viskozite bağımlı değişken, katkı türü, oranı ve sıcaklık bağımsız değişken olarak ele alındığında kurulan basit doğrusal regresyon modelinin özeti Çizelge 8.62’de verilmiştir.

Çizelge 8.62. Regresyon model özeti

Model	R	R kare	Düzeltilmiş R kare	Tahmindeki standart hata
	0,830	0,690	0,686	1001,21516

Kurulan basit doğrusal regresyon modelinin açıklama oranı 0,686’dır. Yani bu değişkenler viskozitedeki değişim miktarının % 68’ini açıklamaktadır. Çizelge 8.63’de

verilen ANOVA tablosuna bakıldığında kurulan regresyon modeli için hesaplanan p olasılık değerinin 0,05 ten küçük olduğu görülmektedir ve bu durum regresyon modelinin istatistiksel olarak anlamlı olduğunu göstermektedir.

Çizelge 8.63. Viskozite deney sonuçları ANOVA tablosu

Model	Kareler toplamı	df	Kareler ort.	F	Sig.
Regresyon	525627952,754	3	175209317,585	174,784	0,000
Kalan	236573905,896	236	1002431,805		
Toplam	762201858,650	239			

Viskozite üzerinde sıcaklık, katkı türü ve oranı değişkenleri tek başına etkiliyken, aynı zamanda bunların farklı kombinasyonları da viskozite değeri üzerinde etkili olmaktadır. Çizelge 8.64'deki model sonuçları incelendiğinde; viskozite için sıcaklık, katkı, katkı oranı, sıcaklık*katkı, sıcaklık*oran, katkı*oran ve sıcaklık*katkı*oran ana etki ve etkileşim etkileri arasında farklılık olduğu görülmektedir ($p=0,000<0,05$).

Çizelge 8.64. Sabit terim eklenmiş model sonuçları

Bağımlı değişken: viskozite					
Değişim kaynağı	Kareler toplamı	sd.	Kareler ortalaması	F	p
Sabit terim	476078635,350	1	476078635,350	329707,493	0,000
Sıcaklık	7,537E8	7	1,077E8	3679570,962	0,000
Katkı	2815,350	1	2815,350	96,210	0,000
Oran	3067008,900	4	766752,225	26202,554	0,000
Sıcaklık * Katkı	13922,850	7	1988,979	67,970	0,000
Sıcaklık * Oran	5316072,900	28	189859,746	6488,159	0,000
Katkı * Oran	31232,400	4	7808,100	266,830	0,000
Sıcaklık * Katkı * Oran	52007,400	28	1857,407	63,474	0,000
Hata	4682,000	160	29,263		
Toplam	7,622E8	239			

NMS ve NK katkıları için betimleyici istatistikler Çizelge 8.65'de verilmiştir. NMS ve NK katkı türü için ortalama ve std. hata değerleri görülmektedir. İki katkı maddesinin de viskozite üzerindeki etkilerinin benzer olduğu görülmektedir.

Çizelge 8.65. Betimleyici istatistikler

	Katkı	N	Ortalama	Std. hata
viskozite	NMS	120	1405,0000	1782,57394

Çizelge 8.65. Betimleyici istatistikler

	Katkı	N	Ortalama	Std. hata
viskozite	NMS	120	1405,0000	1782,57394
	NK	120	1411,8500	1796,51444

Bağımsız örneklem t testi sonuçları Çizelge 8.66’de verilmiştir. Katkı bakımından viskozite için varyansların eşit olduğu Levene’s test ile test edilir. Buna göre varyansların homojen olduğuna karar verilir ($p=0,961 > 0,05$). Katkı bakımından viskozite ortalamaları arasındaki fark bağımsız örneklem t testi ile test edilir. Buna göre, katkı türü bakımından viskozite ortalamaları arasında fark olmadığı sonucuna varılır ($p=0,976 > 0,05$).

Çizelge 8.66. Bağımsız örneklem t testi sonuçları

	Levene's test		t-test		
	F	p	t	sd.	p
Viskozite-varyanslar homojen	0,002	0,961	-0,030	238	0,976

Çizelge 8.67 ve 8.68 sıcaklığın hangi düzeyleri arasındaki viskozite değerinin diğerlerinden istatistiksel olarak farklı olduğunu göstermektedir. Ortalama fark sütununda * varsa fark anlamlıdır denilmektedir. Sıcaklık 90 °C’den 100°C’ye çıktığında vizkozite değeri 3025,2 birim azalmakta olup, bu fark anlamlı olarak yorumlanmaktadır.

Çizelge 8.67. Sıcaklık karşılaştırmalı analiz sonuç tablosu (90-120°C için)

(I) Sıcaklık	(J) Sıcaklık	Ort. fark (I-J)	Std. hata	Sig.	95% Güven aralığı	
					Alt sınır	Üst sınır
90,00	100,00	3025,2000*	1,39672	0,000	3019,8868	3030,5132
	110,00	4296,8000*	1,39672	0,000	4291,4868	4302,1132
	120,00	4908,1000*	1,39672	0,000	4902,7868	4913,4132
	130,00	5197,5000*	1,39672	0,000	5192,1868	5202,8132
	140,00	5353,0000*	1,39672	0,000	5347,6868	5358,3132
	150,00	5445,2000*	1,39672	0,000	5439,8868	5450,5132
	160,00	5511,6000*	1,39672	0,000	5506,2868	5516,9132
100,00	90,00	-3025,2000*	1,39672	0,000	-3030,5132	-3019,8868
	110,00	1271,6000*	1,39672	0,000	1266,2868	1276,9132
	120,00	1882,9000*	1,39672	0,000	1877,5868	1888,2132
	130,00	2172,3000*	1,39672	0,000	2166,9868	2177,6132
	140,00	2327,8000*	1,39672	0,000	2322,4868	2333,1132
	150,00	2420,0000*	1,39672	0,000	2414,6868	2425,3132

	160,00	2486,4000*	1,39672	0,000	2481,0868	2491,7132
110,00	90,00	-4296,8000*	1,39672	0,000	-4302,1132	-4291,4868
	100,00	-1271,6000*	1,39672	0,000	-1276,9132	-1266,2868
	120,00	611,3000*	1,39672	0,000	605,9868	616,6132
	130,00	900,7000*	1,39672	0,000	895,3868	906,0132
	140,00	1056,2000*	1,39672	0,000	1050,8868	1061,5132
	150,00	1148,4000*	1,39672	0,000	1143,0868	1153,7132
	160,00	1214,8000*	1,39672	0,000	1209,4868	1220,1132
120,00	90,00	-4908,1000*	1,39672	0,000	-4913,4132	-4902,7868
	100,00	-1882,9000*	1,39672	0,000	-1888,2132	-1877,5868
	110,00	-611,3000*	1,39672	0,000	-616,6132	-605,9868
	130,00	289,4000*	1,39672	0,000	284,0868	294,7132
	140,00	444,9000*	1,39672	0,000	439,5868	450,2132
	150,00	537,1000*	1,39672	0,000	531,7868	542,4132
	160,00	603,5000*	1,39672	0,000	598,1868	608,8132

Çizelge 8.68. Sıcaklık karşılaştırmalı analiz sonuç tablosu (130-160°C için)

(I)Sıcaklık	(J) Sıcaklık	Ort. fark (I-J)	Std. hata	Sig.	Alt sınır	Üst sınır
130,00	90,00	-5197,5000*	1,39672	0,000	-5202,8132	-5192,1868
	100,00	-2172,3000*	1,39672	0,000	-2177,6132	-2166,9868
	110,00	-900,7000*	1,39672	0,000	-906,0132	-895,3868
	120,00	-289,4000*	1,39672	0,000	-294,7132	-284,0868
	140,00	155,5000*	1,39672	0,000	150,1868	160,8132
	150,00	247,7000*	1,39672	0,000	242,3868	253,0132
	160,00	314,1000*	1,39672	0,000	308,7868	319,4132
140,00	90,00	-5353,0000*	1,39672	0,000	-5358,3132	-5347,6868
	100,00	-2327,8000*	1,39672	0,000	-2333,1132	-2322,4868
	110,00	-1056,2000*	1,39672	0,000	-1061,5132	-1050,8868
	120,00	-444,9000*	1,39672	0,000	-450,2132	-439,5868
	130,00	-155,5000*	1,39672	0,000	-160,8132	-150,1868
	150,00	92,2000*	1,39672	0,000	86,8868	97,5132
	160,00	158,6000*	1,39672	0,000	153,2868	163,9132
150,00	90,00	-5445,2000*	1,39672	0,000	-5450,5132	-5439,8868
	100,00	-2420,0000*	1,39672	0,000	-2425,3132	-2414,6868
	110,00	-1148,4000*	1,39672	0,000	-1153,7132	-1143,0868
	120,00	-537,1000*	1,39672	0,000	-542,4132	-531,7868
	130,00	-247,7000*	1,39672	0,000	-253,0132	-242,3868
	140,00	-92,2000*	1,39672	0,000	-97,5132	-86,8868

	160,00	66,4000*	1,39672	0,000	61,0868	71,7132
160,00	90,00	-5511,6000*	1,39672	0,000	-5516,9132	-5506,2868
	100,00	-2486,4000*	1,39672	0,000	-2491,7132	-2481,0868
	110,00	-1214,8000*	1,39672	0,000	-1220,1132	-1209,4868
	120,00	-603,5000*	1,39672	0,000	-608,8132	-598,1868
	130,00	-314,1000*	1,39672	0,000	-319,4132	-308,7868
	140,00	-158,6000*	1,39672	0,000	-163,9132	-153,2868
	150,00	-66,4000*	1,39672	0,000	-71,7132	-61,0868

Benzer şekilde katkı malzemesinin oranı değiştiğinde viskozite üzerindeki farkların anlamlı olup olmadığı Çizelge 8.69’da görülmektedir. Katkı türüne bakılmaksızın sıcaklık arttığında viskozite değeri azalmakta ve 150°C’den sonra stabil hale gelmektedir. Normal bitüm için viskozite değeri en düşük olup, 150°C’den itibaren katkı oranının değişmesinin anlamı yoktur.

Çizelge 8.69. Katkı oranı karşılaştırmalı analiz sonuçları

(I) oran	(J) oran	Ort. fark (I-J)	Std. hata	Sig.	95% Güven aralığı	
					Alt sınır	Üst sınır
0,00	1,00	-198,6250*	1,10421	0,000	-202,0663	-195,1837
	3,00	-249,3750*	1,10421	0,000	-252,8163	-245,9337
	5,00	-256,5000*	1,10421	0,000	-259,9413	-253,0587
	8,00	-336,3750*	1,10421	0,000	-339,8163	-332,9337
1,00	0,00	198,6250*	1,10421	0,000	195,1837	202,0663
	3,00	-50,7500*	1,10421	0,000	-54,1913	-47,3087
	5,00	-57,8750*	1,10421	0,000	-61,3163	-54,4337
	8,00	-137,7500*	1,10421	0,000	-141,1913	-134,3087
3,00	0,00	249,3750*	1,10421	0,000	245,9337	252,8163
	1,00	50,7500*	1,10421	0,000	47,3087	54,1913
	5,00	-7,1250*	1,10421	0,000	-10,5663	-3,6837
	8,00	-87,0000*	1,10421	0,000	-90,4413	-83,5587
5,00	0,00	256,5000*	1,10421	0,000	253,0587	259,9413
	1,00	57,8750*	1,10421	0,000	54,4337	61,3163
	3,00	7,1250*	1,10421	0,000	3,6837	10,5663
	8,00	-79,8750*	1,10421	0,000	-83,3163	-76,4337
8,00	0,00	336,3750*	1,10421	0,000	332,9337	339,8163
	1,00	137,7500*	1,10421	0,000	134,3087	141,1913
	3,00	87,0000*	1,10421	0,000	83,5587	90,4413
	5,00	79,8750*	1,10421	0,000	76,4337	83,3163

9. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bitümün nano magnezyum spinel oksit ve kolemanit ile modifiyesi neticesinde BSK'nın özellikle sıcak iklim performansı önemli ölçüde iyileşmektedir. Ayrıca her iki katkı için de BSK üretiminde ton başına maliyet artışları ticari olarak satılan katkılara göre oldukça düşüktür.

NMS ve NK bitüm modifiye edici olarak kullanıldığında; bitümün viskozite ve yumuşama noktasını arttırmakta, buna paralel olarak penetrasyon değerleri katkı oranı arttıkça azalmaktadır. Her iki katkı için %8 nano katkı oranında bitümün yumuşama noktası yaklaşık 5-6 °C artmaktadır. Bitümün %8 katkı oranında NMS ve NK ile modifiyesi neticesinde penetrasyon değerinde normal bitüme kıyasla sırasıyla %23 ve %21 azalma meydana gelmektedir.

NMS ve NK modifiyesi ile bitüm viskozitesindeki artışlar sırasıyla %30 ve %28'e ulaşmaktadır. 135 ve 165°C sıcaklıklarda normal ve katkılı bitüm numuneleri üzerinde gerçekleştirilen Brookfield viskozite deney sonuçlarına göre; NMS ve NK modifiyesi ile; optimum katkı oranında (%5) numunelerin sıkıştırma sıcaklığı normal bitüme kıyasla yaklaşık 4,5-5,0 °C, karıştırma sıcaklığı ise 2,5-3,0 °C artmaktadır.

Yaşlandırılmamış bitüm numuneleri üzerinde yapılan DSR deneyleri; NMS ve NK için %8 katkı oranında normal bitüme kıyasla yenilme sıcaklığında yaklaşık 4°C artış olduğunu göstermektedir. Her iki katkının da yüksek sıcaklıklarda tekerlek izi dayanımını önemli ölçüde artırdığı görülmektedir.

Kısa ve uzun dönem yaşlanmaya maruz bırakılan bitüm numuneleri üzerinde gerçekleştirilen DSR deney sonuçlarına göre; 25°C sıcaklıkta %5 NMS ve %5 NK ile modifiye edilen numunelerde G^* .Sin δ yorulma direnç parametresindeki azalma sırasıyla %46 ve %60'dır. Katkı kullanımı ile orta dereceli sıcaklıklarda G^* .Sin δ değeri azalmaya başlamakta, normal bitüme kıyasla modifiye bitüm numunelerinin yorulma çatlak direncinin artmaya başladığı görülmektedir.

Yaşlandırılmış numune DSR deney sonuçlarına göre, en yüksek yorulma dayanımı her iki katkı içinde %5 oranında elde edilmekte, %8 katkı oranına yorulma dayanımı azalmaktadır. Modifiye işleminin başlıca hedefleri katkı malzemesinin maliyetlerde getireceği artışın kabul edilebilir seviyede kalması, asfalt betonun yorulma ve tekerlek izi dayanımının artırılması olduğundan; optimum katkı oranının %5 olarak seçilmesinin uygun olacağı değerlendirilmiştir.

NMS ve NK modifiye bitüm üzerinde gerçekleştirilen BBR deneylerine göre; modifiye işlemi sonrasında numunelerin sünme rijitliği artmaktadır. Bu nedenle çalışma neticesinde elde edilen bitümün sıcak iklim bölgelerinde kullanılmasının daha etkin olacağı değerlendirilmektedir.

BSK deneyleri kapsamında; Marshall tasarım yöntemine göre %3,5-6,5 bitüm oranlarında normal, NMS ve NK katkılı olmak üzere toplam 63 numune dökülmüştür. Superpave tasarım yöntemine göre yoğurmalı sıkıştırıcı ile dökülecek BSK numunelerinde kullanılacak optimum bitüm yüzdeleri Marshall yöntemine göre tespit edilmiştir. Bu bağlamda, normal bitüm için OBO %4,50; NMS için %4,47 ve NK modifiye bitüm kullanılması halinde %4,60 olarak tespit edilmiştir.

Superpave tasarımına göre yoğurmalı sıkıştırıcı ile hazırlanan normal, NMS ve NK katkılı BSK numuneleri için optimum bitüm oranları sırasıyla %4,28; %4,21 ve %4,33 olarak tespit edilmiştir.

Marshall ve Superpave tasarım yöntemleri kullanılarak dökülen NMS numuneleri için; gerekli optimum bitüm oranının, normal bitümle hazırlanmış numunelerin optimum bitüm oranına kıyasla daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Her iki katkı için de geçerli olmak üzere; Superpave tasarım yöntemine göre elde edilen optimum bitüm oranları Marshall yöntemi ile elde edilenlere kıyasla daha düşük bulunmuştur.

İndirekt çekme dayanımı deney sonuçlarına göre, şartlandırılmamış numuneler için; normal ve NMS modifiye bitüm ile hazırlanan BSK numunelerinin ortalama indirekt çekme dayanımları yaklaşık olarak aynı değerdedir. NK modifiye BSK numunelerinin ortalama indirekt çekme dayanımları normal numunelere göre %2 daha yüksektir.

Şartlandırılmış numune sonuçları da dikkate alındığında, normal, NMS ve NK modifiye bitüm BSK numuneleri indirekt çekme mukavemeti oranları (ITSR) %80'in üzerinde olduğundan, numunelerin nem dayanımının yeterli düzeyde olduğu tespit edilmiştir.

Şartlandırılmış numuneler için; her iki katkı ile bitümün modifiyesi neticesinde normal bitüm BSK numunelerine kıyasla numunelerin nem dayanımı artmakta, karışımların adezyon yeteneği gelişmektedir. Bu nedenle NMS ve NK modifiye bitüm ile inşa edilecek kaplamalarda daha az soyulma hasarı görüleceği ve durabilitesi yüksek kaplamalar inşa edilebileceği değerlendirilmektedir.

Şartlandırılmış numunelerde nem dayanımı açısından en iyi sonucu NK modifiye bitüm ile hazırlanan BSK numuneleri vermektedir. Normal bitüm BSK numunelerine kıyasla ortalama indirekt çekme dayanımı %6 daha yüksektir.

Bitüm ağırlığınca %5 katkı oranında NMS ve NK modifiye bitüm ile aşınma tipi asfalt beton üretildiğinde; asfalt betonu birim maliyetlerinde NMS için %6,5; kolemanit için ise %2,1 artış olmaktadır. Bu bağlamda çalışma kapsamında kullanılan her iki katkının da uygulamada benzer amaçla kullanılan ticari katkılara kıyasla çok daha ekonomik olduğu anlaşılmaktadır. Geleneksel ve yaygın olarak kullanılan SBS, kauçuk vb. katkıların yerine yerli, çevre dostu ve modifiye asfaltta ton başına %6-10 oranında daha ucuz olan bu katkıların alternatif olarak kullanılabileceği değerlendirilmektedir.

Dönel viskozite deney sonuçlarının modellenmesi neticesinde; viskozite üzerinde sıcaklık, katkı türü ve oranı değişkenleri tek başına etkiliyken, aynı zamanda bunların farklı kombinasyonlarının da viskozite değeri üzerinde etkili olduğu tespit edilmiştir. Viskozite için sıcaklık, katkı, katkı oranı, sıcaklık*katkı, sıcaklık*oran, katkı*oran ve sıcaklık*katkı*oran ana etki ve etkileşim etkileri arasında farklılık olduğu görülmektedir ($p=0,000<0,05$).

Nano malzemeler konusunda yapılabilecek ileri çalışmalar kapsamında; aynı katkıların hem mikro boyutta hem de nano boyutta kullanılarak bitümün modifiye edilmesi halinde, bitüm performanslarında oluşacak değişimlerin kıyaslanmasının uygun olacağı

değerlendirilmektedir. Bu çalışma ile Emet ve Bigadiçte bor işletmelerinde göletlerde biriken kolemanit atıklarının bitüm özelliklerini geliştirmede kullanılabileceği gösterilmiştir. (kurutularak)

Katkı ile bitümün mekanik olarak karıştırılması haricinde farklı karıştırma yöntemleri kullanılarak (manyetik karıştırıcı vb.) bitümün modifiye edilebileceği değerlendirilmektedir. Plentte bitüm ve agrega karıştırılmadan önce bitüme dozlanması tavsiye olunmaktadır. Spinel oksit ve kolemanit gibi inorganik minerallerin bitümün organik yapısından dolayı atık organik bileşikler (reçine, melas vb.) ile reaksiyona sokularak organo bileşikleri halinde bitüme katkılандırılmasının üniformluluk açısından oldukça etkili olacağı düşünülmektedir.

Dünyadaki bor rezervlerinin büyük bir bölümünün (yaklaşık %72,9) Türkiye’de olduğu değerlendirildiğinde, bu çalışmanın sonuçları kolemanit minerali için olduğu kadar diğer bor mineralleri (Üleksit, vb.) için de gelecek vaad etmekte olup, çalışmanın diğer bor mineralleri üzerinde de gerçekleştirilerek, bitüm ve BSK performansı üzerindeki etkilerinin araştırılmasının uygun olabileceği değerlendirilmektedir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Acar, G., 2011, Bitümlü sıcak karışım ve uygulamaları, s. 52.
- Adlinge, S.S., Gupta, A.K., 2013, Pavement deterioration and its causes, IOSR Journal of Mechanical&Civil Engineering, p. 09-15.
- Advanced Asphalt Technologies, 2011, A manual for design of hot mix asphalt with commentary, National Cooperative Highway Research Report 673, p. 7, 21, 30, 41, 43, 49.
- Ali, S.I.A., Ismail, A., Yusoff, N.I., Hassan, N.A., Ibrahim, A.N.H., 2016, Characterization of the performance of Aluminium Oxide nanoparticles modified asphalt binder, Jurnal Teknologi, 78 (4), p. 91-96.
- Amirkhanian, A.N., Xiao, F., Amirkhanian, S.N., 2011, Characterization of unaged asphalt binder modified with Carbon Nano particles, International Journal of Pavement Research and Technology, 4 (5), p.281-286.
- Arivalagan, K., Ravichandran, S., Rangasamy, K., Karthikeyan, E., 2011, Nanomaterials and its potential applications, International Journal of ChemTech Research, 3(2), p.534-538.
- Arslan, D., 2010, Esnek üstyapıların performans özelliklerinin sentetik metal ve polibor katkı maddeleriyle geliştirilmesi, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 298 s.
- Arslan, D., Gürü, M., Çubuk, M.K., Çubuk, M., 2011, Improvement of bitumen and bituminous mixtures performances by Triethylene Glycol based Synthetic Polyboron, Construction And Building Materials, 25, p.3863-3868.
- Arslan, D., Gürü, M., Çubuk, M.K., 2012, Performance assessment of organic-based Synthetic Calcium and Boric Acid modified bitumens, Fuel, 102, p.766-772.
- Asphalt Institute, 2007, The Asphalt Handbook, Seventh Edition, USA, p. 36, 44, 46, 48, 49, 50, 64, 86, 166, 176, 178, 186, 188, 190, 193, 197, 233, 542, 545.
- Becker, Y., Mendez, M.P., Rodriguez, Y., 2001, Polymer modified asphalt, Vision Tecnologica, 9(1), p.39-49.
- Boediger, J.C., 1943, Adhesivity of asphalts to mineral aggregates, Standard Catalytic Company, a Corporation of Delaware.
- Brydson, R.M., Hammond, C., 2005, Generic methodologies for nanotechnology:classification and fabrication, Nanoscale Science And Technology, R. Kelsall, I. Hamley, M. Geoghegan (Eds.), John Wiley&Sons, Ltd, p. 1.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Chadbourn, B.A., Skok, E.L., Crow, B.L., Spindler, S., Newcomb, D.E., 2000, The effect of voids in mineral aggregate (VMA) on hot-mix asphalt pavements, Final Report 1996-1999, Minnesota Department of Transportation Office of Research Services, 125 p.
- Chang, C.M., Gonzalez, O., Krugler, P., 2015, Lessons learned about successfull flexible pavements, Bituminous Mixtures&Pavements VI, A.F. Nikolaides(Ed.), Thessaloniki, Greece.
- Cominsky, R.J., 1994, The superpave mix design manual for new construction and overlays, SHRP-A-407, Strategic Highway Research Program, 172 p.
- Çubuk, M., Gürü, M., Çubuk, M.K., Arslan, D., 2013, Bitümün özelliklerinin organik esaslı Magnezyum katkı maddesi ile geliştirilmesi, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 28 (2), s.257-264.
- Deniz, M.T., 2009, Esnek üstyapı kaplamalarında bitümle birlikte bağlayıcı olarak granüler sülfür kullanımının kalıcı deformasyona etkisi, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 189 s.
- Demirdöven, J.B., Arditi, D., 2012, Yapılarda ve yapım yönetiminde nanoteknoloji uygulamaları, 2. Proje ve Yapım Yönetimi Kongresi, İzmir İleri teknoloji Enstitüsü, Urla, İzmir.
- Druta, C., 2006, A micromechanical approach for predicting the complex shear modulus and accumulated shear strain of asphalt mixtures from binder and mastics, Louisiana State University, 236 p.
- Ekblad, J., Lundström, R., 2017, Soft bitumen asphalt produced using RAP, Materials and Structures, DOI 10.1617/s11527-016-0871-z.
- ETİ MADEN, 2015,
[http://www.etimaden.gov.tr/files/files/162017%20Ground%20Colemanite\(%20-75%20Micron\).pdf](http://www.etimaden.gov.tr/files/files/162017%20Ground%20Colemanite(%20-75%20Micron).pdf), erişim tarihi: 04.09.2017
- Ezzat, H., El-Badawy, S., Gabr, A., Zaki, E.I., Breakah, T., 2016, Evaluation of asphalt binders modified with nanoclay and nanosilica, Procedia Engineering, The 3 rd International Conference on Transportation Geotechnics, 143, p.1260-1267.
- FHWA, 1997, Superpave for the generalist engineer and project staff, Participant manual, Publication no. FHWA HI 97-031, p. V-7.
- FHWA, 2001, Superpave mixture design guide, WesTrack Forensic Team Consensus Report.
- FHWA, 2009, Nanoscale approaches for highway research, Exploratory advanced research program, Publication no. FHWA-HRT-10-033 HRTM-04/01-10(1M)E.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Fischer, H.G.M., 1941, Asphalt with improved adhesion properties for aggregates, Standard Catalytic Company, a Corporation of Delaware.
- Galooyak, S.S., Palassi, M., Goli, A., Farahani, H.Z., 2015, Performance evaluation of Nano-Silica modified bitumen, International Journal Of Transportation Engineering, 3 (1), p.55-66.
- Garber, N.J., Hoel, L.A., 2009, Traffic and Highway Engineering (Fourth Edition), Cengage Learning, p. 951, 958, 960, 963, 965, 974, 976, 980, 994, 1003, 1005, 1010, 1014.
- Geçkil, T., 2008, Siyah karbonun bitümlü sıcak karışımların özelliklerine etkisinin incelenmesi, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Ge, Z., Gao, Z., 2008, Applications of nanotechnology and nanomaterials in construction, First International Conference on Construction in Developing Countries, Pakistan.
- Green, P.J., 1998, Binders, Asphalt Surfacing, J.C. Nicholls(Ed.), E&FN SPON, p.58, 69.
- Güngör, A.G., Sağlık, A., 2009, Normal ve modifiye bitümlerin kalıcı deformasyonlara karşı direncinin sıfır kesme viskozitesi ile belirlenmesi, 5. Ulusal Asfalt Sempozyumu ve Sergisi.
- Gürmen, S., Ebin, B., 2008, Nano partiküller ve üretim yöntemleri, TMMOB Metalurji Mühendisleri Odası Metalurji Dergisi, 150, 31-37.
- Gürü, M., Çubuk, M.K., Arslan, D., Aminbakhsh, S., 2017, Effects of sugar beet molasses and molasses-based boron oxide compound on bitumen properties, Journal of Materials in Civil Engineering, 29(4).
- Hagos, E.T., 2008, The effect of aging on binder properties of porous asphalt concrete, PhD. thesis, Delft University of Technology, 320 p.
- Harman, T., D'Angelo, J., Bukowski, J., 2002, Superpave Asphalt Mixture Design Workshop, US Department of Transportation Federal Highway Administration, p. 3, 8, 9, 15, 21, 22, 33, 46.
- Helvacı, C., 2003, Türkiye Borat Yatakları, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 5 (1), 4-41.
- Hicks, R.G., Curren, P., Lundy, J.R., 2003, Asphalt Paving Design Guide, Asphalt Pavement Association of Oregon, 2.1, 2.5, 2.7.
- Hossain, M., 2016, Superpave volumetric mixture design and analysis handbook, Kansas State University.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Huber, G.A., 1994, Weather database for the Superpave mix design system, Strategic Highway Research Program, SHRP-A-648, p. 3, 4.
- Huber, G.A., 1999, Methods to achieve rut resistance durable pavements, Synthesis of Highway Practice 274, Transportation Research Board, National Research Council, 61 p.
- Hunter, R.N., Self, A., Read, J., 2015, The Shell Bitumen Handbook, Sixth Edition, p. 6, 60, 65, 70, 72, 79, 88, 91, 98, 119, 121, 123, 153, 175, 218, 298, 299, 301, 304, 331, 337, 449, 451, 458, 468, 574, 575.
- Isacsson, U., Lu, X., 1999, Characterization of bitumens modified with SEBS, EVA and EBA polymers, Journal of Materials Science, 34, 3737-3745.
- İSFALT, 2001, Asfalt ve uygulamaları, İstanbul Büyükşehir Belediyesi, İSFALT Bilimsel Yayın No:1, İstanbul, s. 23, 33, 37, 56, 58, 92, 94.
- İskender, E., 2016, Evaluation of mechanical properties of nano-clay modified asphalt mixtures, Measurement, 93, 359-371.
- Jackson, N.M., Czor, L.J., 2003, 100 mm diameter mold used with Superpave Gyratory Compactor, Journal of Materials in Civil Engineering, 15 (1), 60-66.
- Jamshidi, A., Hasan, M.R.M., Yao, H., You, Z., Hamzah, M.O., 2015, Characterization of the rate of change of rheological properties of nano-modified asphalt, Construction And Building Materials, 98, 437-446.
- Jung, D.H., Vinson, T.S., 1994, Low-temperature cracking: test selection, Strategic Highway Research Program, Washington DC.
- Jung, S.H., 2006, The effects of asphalt binder oxidation on hot mix asphalt concrete mixture rheology and fatigue performance, PhD. thesis, Texas A&M University, 172 p.
- Kandhal, P.S., Chakraborty, S., 1996, Effect of asphalt film thickness on short term and long term aging of asphalt paving mixtures, National Center for Asphalt Technology-NCAT Report 96-01, Auburn.
- Kandhal, P.S., Mallick, R.B., 2001, Effect of mix gradation on rutting potential of dense-graded asphalt mixtures, Transportation Research Board, p.146, 151.
- Karacasu, M., 2016, Yol Üstyapı Deneyleri Ders Notları, s.7, 11, 15, 20, 125.
- Karahancer, Ş.S., Kiristi, M., Terzi, S., Saltan, M., Oksuz, A.U., Oksuz, L., 2014, Performance evaluation of nano-modified asphalt concrete, Construction and Building Materials, 71, 283-288.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Karayolları Genel Müdürlüğü, 1998, Karayolu Bakım El Kitabı, Bakım Dairesi Başkanlığı, Ankara, s.149.
- Karayolları Genel Müdürlüğü, 2013, Karayolu Teknik Şartnamesi, s. 407.
- Karayolları Genel Müdürlüğü, 2017, Yol ağı bilgileri, <http://www.kgm.gov.tr/Sayfalar/KGM/SiteTr/Kurumsal/YolAgi.aspx>, erişim tarihi:10.07.2017
- Karayolları Genel Müdürlüğü, 2017, Türkiye genelinde yıllık taşıt-km, yolcu-km ve ton-km değerleri, <http://www.kgm.gov.tr/SiteCollectionDocuments/KGMdocuments/Istatistikler/TrafikveUlasimBilgileri/16TrafikUlasimBilgileri.pdf>, erişim tarihi: 10.07.2017
- Kennedy, T.W., Huber, G.A., Harrigan, E.T., Cominsky, R.J., Hughes, C.S., Quintus, H.V., Moulthrop, J.S., 1994, Superior Performing Asphalt Pavements (Superpave):The Product of the SHRP Asphalt ResearchProgram, 26.
- Khan, Z.A., Wahab, H.I.A., Asi, İ., Ramadhan, R., 1998, Comparative study of asphalt concrete laboratory compaction methods to simulate field compaction, Construction and Building Materials, 12, 373-384.
- Khattak, M.J., Khattab, A., Rizvi, H.R., Zhang, P.,2012, The impact of carbon nano-fiber modification on asphalt binder rheology, Construction and Building Materials, 30, 257-264.
- Khosla, N.P., Harikrishnan, K.I., 2007, Tensile strength- A design and evaluation tool for Superpave mixtures, FHWA/NC/2006-24, p.2, 3, 14.
- Klinger, E.W., 1943, Bituminous composition comprising an asphalt and a polymerized ester of methacrylic acid, Standard Oil Development Company, a Corporation of Delaware.
- Kök, B.V., Yılmaz, M., Geçkil, A., 2013, Evaluation of low temperature and elastic properties of crumb rubber and SBS modified bitumen and mixtures, Journal of Materials In Civil Engineering, 25, 2, 257-265.
- Köksal, F., Köseoğlu, R., 2014, Nanobilim ve Nanoteknoloji, Nobel Akademik Yayıncılık, s. 20-26.
- Kumar, P., Mehndiratta, H.C., Singh, K.L., 2009, Rheological properties of crumb rubber modified bitumen-Alab study, Journal of Scientific& Industrial Research, Vol.68, 812-816.
- Kutluhan, S., Açar, E., 2009, Bitümlü sıcak karışımlarda tekerlek izi oluşumunu etkileyen faktörler ve azaltmaya yönelik öneriler, İTÜ Mühendislik Dergisi, 8 (6) 179-191.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Lavin, P.G., 2003, Asphalt Pavements, Spon Press, London and New York, 2, 8, 188, p. 23, 24, 31, 33, 36, 49, 166.
- Lewandowski, L. H., 1994, Polymer modification of paving asphalt binders, Rubber Chemistry and Technology, Vol. 67, No. 3, p. 447-480.
- Loh, S., Olek, J., 1999, Contributions of PG graded asphalt to low temperature cracking resistance of pavement, Joint Transportation Research Program, Final Report FHWA/IN/JTRP-96/22, Purdue University, 172 p.
- Long, F.M., 2001, Permanent deformation of asphalt concrete pavements: a nonlinear viscoelastic approach to mix analyses and design, PhD. thesis, University of California, 300 p.
- Lu, Q., 2005, Investigation of conditions for moisture damage in asphalt concrete and appropriate laboratory test methods, Doctoral Thesis, University of California, Berkeley, p.2.
- Luminari, M., Fidato, A., 1998, State of the art report on mix design, Bituminous Binders and Mixes, L. Francken (Ed.), Rilem report 17, E&FN SPON, p. 60, 61.
- Mahdi, L.M.J., Muniandy, R., Yunus, R.B., Hasham S., Aburkaba, E., 2013, Effect of short term aging on organic montmorillonite nanoclay modified asphalt, Indian Journal of Science and Technology, 6 (11), 5434-5442.
- Mallick, R.B., Korchi, T.E., 2013, Pavement Engineering: Principles and Practice, CRC Press Taylor & Francis Group, Second Edition., p.108, 208, 210, 211, 212, 224, 225, 226, 229, 235, 239, 263, 266, 603.
- Mann, S., 2006, Nanotechnology and Construction, European Nanotechnology Gateway-Nanoforum report, Institute of Nanotechnology.
- Masson, J.F., Collins, P., Polomark, G.M., 2005, Steric hardening and the ordering of asphaltenes in bitumen, Energy and Fuels, 19 (1), 120-122.
- McGennis, R.B., Anderson, M., Kennedy, T.W., Solaimanian, M., 1995, Background of Superpave asphalt mixture design and analysis, Federal Highway Administration, Publication no. FHWA-SA-95-003, p.8, 44, 83, 112.
- Menlik, T., Sözen, A., Gürü, M., Çağlayan, N., Öztaş, S., 2015, Spineloksit partikül içeren nanoakışkanların termofiziksel özelliklerinin belirlenmesi, Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 1 (2), 285-304.
- Minnesota Asphalt Pavement Association (MAPA), 2014, Asphalt Paving Design Guide, p. 2-3.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Moghaddam, T.B., Soltani, M., Karim, M.R., 2014, Evaluation of permanent deformation characteristics of unmodified and Polyethylene Terephthalate modified asphalt mixtures using dynamic creep test, *Materials and Design*, 53, 317-324.
- Mubaraki, M., Ali, S.I.A., Ismail, A., Yusoff, N.I., 2016, Rheological evaluation of asphalt cements modified with ASA polymer and Al₂O₃ nanoparticles, *Advances in Transportation Geotechnics 3. The 3 rd International Conference on Transportation Geotechnics*, *Procedia Engineering*, 143, 1276-1284.
- Nazarov, A.A., Mulyukov, R.R., 2003, Nanostructured materials, *Handbook of Nanoscience, Engineering and Technology*, W.A. Goddard, D.W. Brenner, S.E. Lyshevski, G.J. Iafrate (Eds.), CRC Press, p.653.
- Nejad, F. M., Tanzadeh, R., Tanzadeh, J., Hamed, G.H., 2014, Investigating the effect of nanoparticles on the rutting behaviour of hot-mix asphalt, *International Journal Of Pavement Engineering*, 17 (4), 353-362.
- Nikolaides, A., 2015, Highway Engineering- Pavements, Materials and Control of Quality, e-kitap, 61, 63, 69, 71, 79, 80, 82, 173, 175, 180, 182, 188, 191, 195, 205, 210, 235, 236, 239, 639, 642.
- https://www.academia.edu/28614498/Pavement_Highway_Engineering_Pavements_Materials_and_Control_of_Quality-CRC_Press_2014, erişim tarihi: 28.10.2017
- Northwest Pavement Management Association, 1999, Pavement surface condition field rating manual for asphalt pavements, p. 15, 17.
- O'Connell, J., Steyn, M., 2017, An overview of the ageing of bituminous binders, 36 th Southern African Transport Conference (SATC 2017), p.308-324.
- Opara, K.R., Skakuj, M., Stöckner, M., 2016, Factors affecting raveling of motorway pavements- A field experiment with new additives to the deicing brine, *Construction and Building Materials*, 113, 174-187.
- Orhan, F., 2012, Bitümlü Karışımlar Laboratuvarı Çalışmaları, Karayolları Genel Müdürlüğü, s. 4, 6, 8.
- Oruç, Ş., Yılmaz, B., Sancak, K., 2015, Effect of Boron containing additives on rheological properties of asphalt binder, *Road Materials and Pavement Design*.
- Özdamar, K., 2018, Paket Programlar ile İstatistiksel Veri Analizi, Cilt 2, Eskişehir Nisan Kitabevi, s.3, 123, 179.
- Papagiannakis, A.T., Masad, E.A., 2008, *Pavement Design and Materials*, John Wiley & Sons Inc, p. 76, 81, 83, 98, 122, 123, 128, 130, 145, 146.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Pekmezci, B.Y., Atahan, H.N., 2014, Kimyasal ve nano katkıları: Betonda kullanımı ve beton performansına etkileri, Hazır Beton, Mayıs-Haziran, s.69-82.
- Powell, R.L., 2008, Modeling rutting performance on the NCAT pavement test track, TRB 87th annual meeting, Washington DC, USA.
- Rao, C.N.R., Cheetham A.K., 2006, Materials Science at the Nanoscale, Nanomaterials Handbook, Y. Gogotsi (Ed.), Taylor&Francis Group, CRC Press, ABD, p.2-3.
- Sadid, H., Wabrek, R.M., Dongare, S., 2010, Methods of HMA mix design, Materials acceptance risk analysis: Superpave hot mix asphalt, B. Coryell, A. Ebrahimpour (Eds.), Idaho Transportation Department Research Report RP182B, p.7, 8.
- Saltan, M., Terzi, S., Karahançer, Ş., 2018, Performance analysis of nano modified bitumen and hot mix asphalt, Construction and Building Materials, 173, 228-237.
- Santagata, E., Baglieri, O., Tsantilis, L., Dalmazzo, D., 2012, Rheological characterization of bituminous binders modified with Carbon Nanotubes, Procedia Social and Behavioral Sciences, 53, 546-555.
- Santagata, E., Baglieri, O., Tsantilis, L., Brignone, I., 2015, Effect of sonication on high temperature properties of bituminous binders reinforced with nano-additives, Construction And Building Materials, 75, 395-403.
- Shafabakhsh, G., Mirabdolazimi, S.M., Sadeghnejad, M., 2014, Evaluation the effect of nano-TiO₂ on the rutting and fatigue behavior of asphalt mixtures, Construction And Building Materials, 54, 566-571.
- Singh, B., Saboo, N., Kumar, P., 2016, Effect of spindle diameter and plate gap on the rheological properties of asphalt binders, Functional Pavement Design, S. Erkens, X. Liu, K. Anupam, Y. Tan (Eds.), Taylor&Francis Group, CRC Press, UK, p. 293.
- Solanki, P., Songera, D.S., 2014, Influence of TiO₂ nano particles blends on properties of asphalt, Nano Science And Nano Technology, 8, 10, 387-390.
- Southern, M., 2015, A perspective of bituminous binder specifications, Advances in Asphalt Materials, S.C. Huang, H.D. Benedetto (Eds.), Woodhead publishing, p.10,11.
- Speight, J.G., 2015, Asphalt Materials Science and Technology, Butterworth-Heinemann, p.35, 152, 177, 208, 211, 220, 227, 280, 367, 372, 418.
- Sun, L., 2016, Structural Behavior of Asphalt Pavements, Butterworth-Heinemann, p.243, 249.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Superpave 2000- Improved standards for a new millennium, 1999, Canadian Strategic Highway Research Program, C-SHRP Technical Brief#17, p.6.
- Steyn, W.J., 2011, Applications of Nanotechnology in Road Pavement Engineering, Nanotechnology in Civil Infrastructure, K. Gopalakrishnan, B. Birgisson, P. Taylor, N.A. Okine(Eds.), Springer, 49-83.
- Tam, W.O., 2006, Highway Materials, The Handbook of Highway Engineering, T.F. Fwa (Ed.), CRC Press Taylor&Francis Group, USA, p.7-4, 7-8, 7-10, 7-13, 7-17, 7-27, 7-28, 7-29, 16-34.
- Tekerek, A.Ş., 2007, LaMn₂Si₂ alaışımının nanoparçacıklarının manyetik ve yapısal özellikleri, Yüksek Lisans tezi, Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 51 s.
- Traxler, R.N., Wilkinson, C.E., 1954, Process for manufacturing asphalt-rubber blends, The Texas Company, a corporation of Delaware.
- Tunç, A., 2007, Yol Malzemeleri ve Uygulamaları (2. Basım), Nobel Yayın, s. 25, 31, 47, 80, 98, 106, 170, 178.
- TÜİK, 2017, Yıllara göre motorlu kara taşıtları sayısı, <http://www.tuik.gov.tr/PreHaberBultenleri.do?id=24596>, erişim tarihi: 21.11.2017
- TÜPRAŞ, 2017, Faaliyet Raporu 2016, https://tprstaticfilessa.blob.core.windows.net/assets/uploads/faaliyet-raporlari/TUP_FRAT_2016_MTB.pdf, erişim tarihi: 19.07.2017
- Uğur, P., Aksel, C., 2009, MgO-MgAl₂O₄-SnO₂ Kompozit refrakterlerinin mekanik özellikleri ve ısı performansı, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 9 (3), 171-180.
- Vasilievici, G., Bombos, D., Bombos, M., Juganaru, T., 2013, Nanoparticles for Asphalt Composite Obtained by Milling, Materiale Plastice, 50 (1), 44-48.
- Verstraeten, J., 1995, Bituminous materials with a high resistance to flow rutting, PIARC Technical Committee on Flexible Roads, Belgium.
- WesTrack Forensic Team Consensus Report, 2001, Superpave Mixture Design Guide, Federal Highway Administration, Washington, DC, p. 2, 4, 5.
- Wilson, M., Kannangara, K., Smith, G., Simmons, M., Raguse, B., 2012, Nanoteknolojiye Giriş, (Çev. E.Şentürk, İ.Okur, S. Duman, S. Akbulut), İstanbul Değişim Yayınları, s. 7-42, 57-76.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Witczack, M.W., El-Basyouny, M.M., 2004, Guide for mechanistic-empirical design of new and rehabilitated pavement structures, final document, Appendix GG-1:Calibration of permanent deformation models for flexible pavements, prepared for NCHRP, Submitted by ARA, Inc., ERES Division, 456 p.
- Wolfgang, L., Bottom-up Methods for Making Nanotechnology Products.<http://www.azonano.com/details.asp? Article ID=1079>, erişim tarihi: 05.03.2018.
- Woodside, A., 1998, Aggregates and fillers, Asphalt Surfacing, J.C. Nicholls(Ed.), E&FN SPON, p.23, 28, 29.
- Xie, N., Shi, X., 2014, Evaluation of plus grades of performance graded (PG) asphalt binder, Western Transportation Institute, Report NM 14-MS-01-008, p.10,11,12,18.
- Yang, J., Tighe, S., 2013, A review of advances of Nanotechnology in asphalt mixtures, 13th COTA International Conference of Transportation Professionals, Social and Behavioral Sciences, 96, 1269-1276.
- Yao, H., You, Z., 2016, Effectiveness of Micro and Nanomaterials in asphalt mixtures through Dynamic Modulus and rutting tests, Journal Of Nanomaterials, 10.
- You, Z., Beale, J.M., Foley, J.M., Roy, S., Odegard, G.M., 2011, Nanoclay modified asphalt materials: Preparation and characterization, Construction and Building Materials, 25, 1072-1078.
- Zaniewski, J.P., Pumphrey, M.E., 2004, Evaluation of performance graded asphalt binder equipment and testing protocol, Asphalt Technology Program, West Virginia University, 101 p.
- Zaniewski, J.P., Srinivasan, G., 2004, Evaluation of indirect tensile strength to identify asphalt concrete rutting potential, Asphalt Technology Program, West Virginia University.
- Zhu, J., Birgisson, B., Kringos, N., 2014, Polymer modification of bitumen: Advances and challenges, European Polymer Journal, 54, 18-38.

EK AÇIKLAMALAR

EK Açıklama-A: BSK ve Bütüm deneylerine ait fotoğraflar



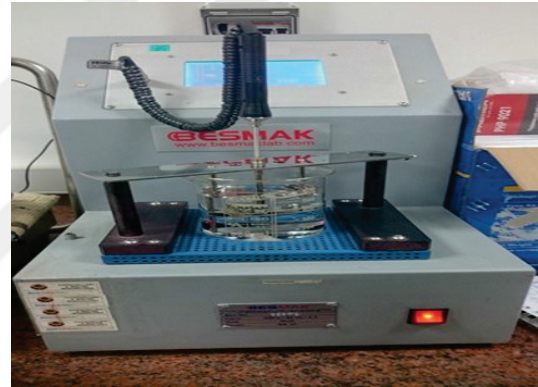
Şekil 1. Penetrasyon ve yumuşama noktası deneyi



Şekil 2. %1 NK Penetrasyon ve yumuşama noktası deneyi



Şekil 3. Penetrasyon, yumuşama noktası, DSR deney numuneleri



Şekil 4. Yumuşama noktası deneyi

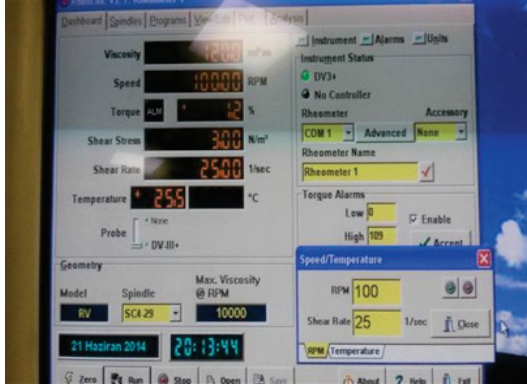


Şekil 5. Yumuşama noktası deneyi



Şekil 6. Deneylerde kullanılan Brookfield viskozite cihazı

EK AÇIKLAMA-A: BİTÜM VE BSK DENEY FOTOĞRAFLARI



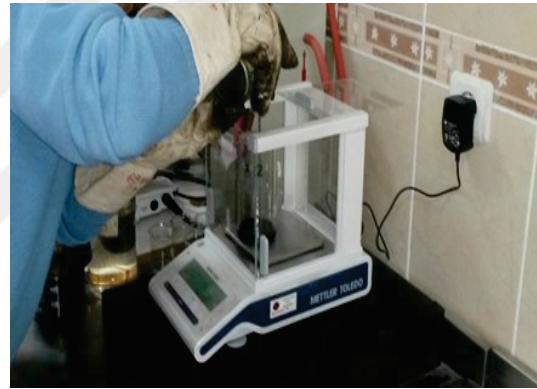
Şekil 7. Brookfield viskozite deneyi ekran görünümü



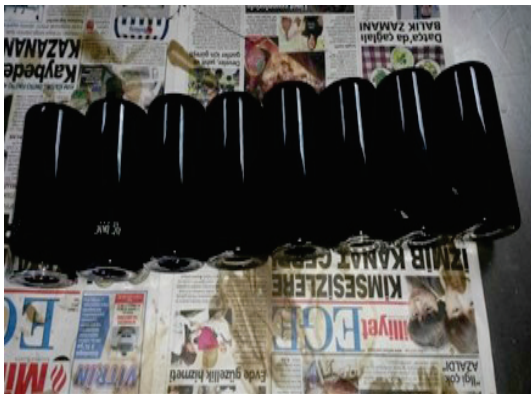
Şekil 8. Deneylerde kullanılan RTFOT deney cihazı



Şekil 9. RTPOT deney tüplerinin hazırlanması



Şekil 10. RTFOT deneyi esnasında deney tüplerinin doldurulması



Şekil 11. 35 g hazırlanan RTFOT deney tüpleri



Şekil 12 - Deneye tabi tutulmuş bitüm numune kapları

EK AÇIKLAMA-A: BİTÜM VE BSK DENEY FOTOĞRAFLARI



Şekil 13. RTFOT sonrası numunelerin PAV tepsilerine aktarılması



Şekil 14. %3 ve %5 NMS numuneleri PAV deneyinde



Şekil 15. Karayolları 2'nci Bölge Müdürlüğü PAV cihazı



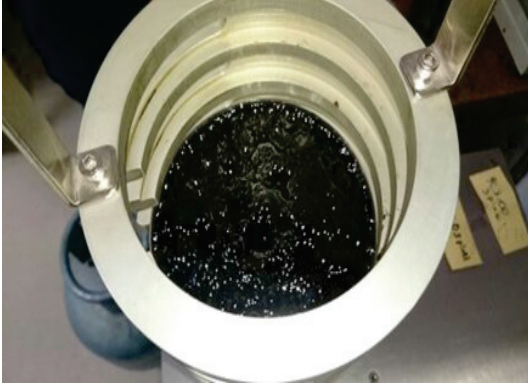
Şekil 16. PAV deney tavalarının raflara yerleştirilmesi



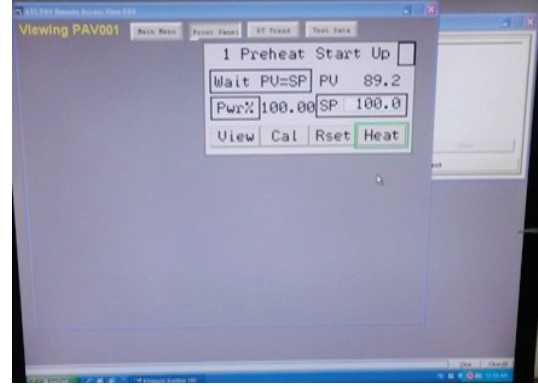
Şekil 17. PAV deney tavaları raflara yerleştirilmiş halde



Şekil 18. PAV deneyinde numunenin vakum için hazırlanması



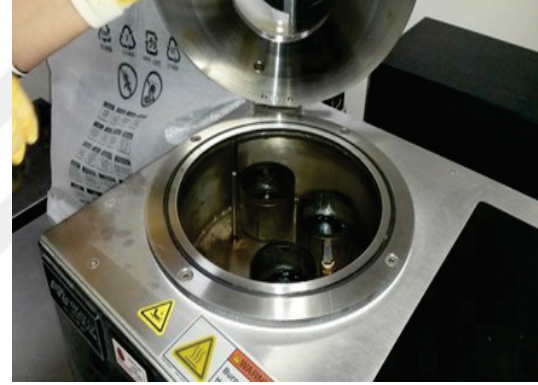
Şekil 19. Raf içerisindeki PAV deney numunesi



Şekil 20. PAV deneyi ekran görüntüsü



Şekil 21. PAV deneyi vakum için numunelerin kaplara doldurulması



Şekil 22. Numunelerin vakum cihazına yerleştirilmesi



Şekil 23. Vakum cihazındaki numuneler



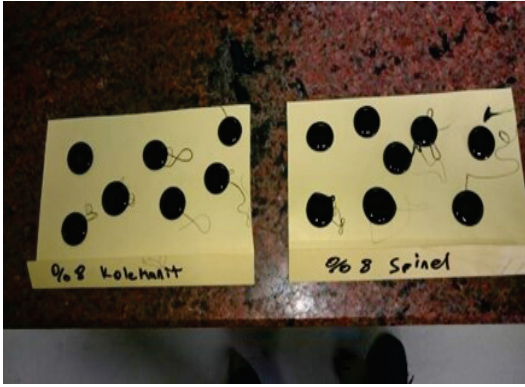
Şekil 24. Yaşlandırılmamış DSR deneyi numuneleri



Şekil 25. Yaşlandırılmamış DSR deney numuneleri



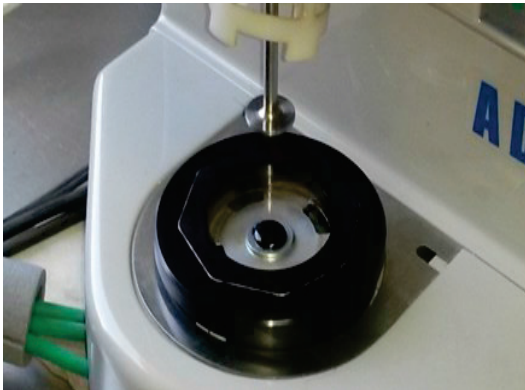
Şekil 26. %5 NK ve NMS yaşlandırılmamış DSR deney numuneleri



Şekil 27. %8 NK ve NMS yaşlandırılmamış DSR deney numuneleri



Şekil 28. Uzun dönem yaşlandırılmış DSR deney numuneleri



Şekil 29. Yaşlandırılmamış bitüm numunesi DSR deneyi esnasında



Şekil 30. DSR deneyi ekran görüntüsü

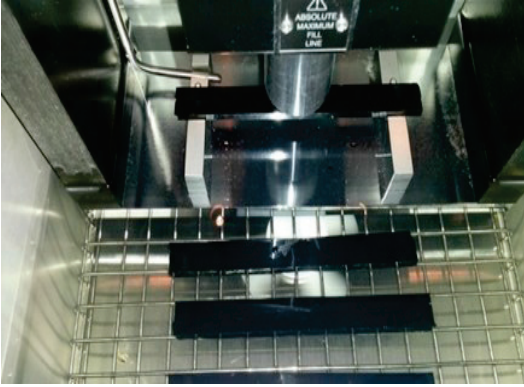
EK AÇIKLAMA-A: BİTÜM VE BSK DENEY FOTOĞRAFLARI



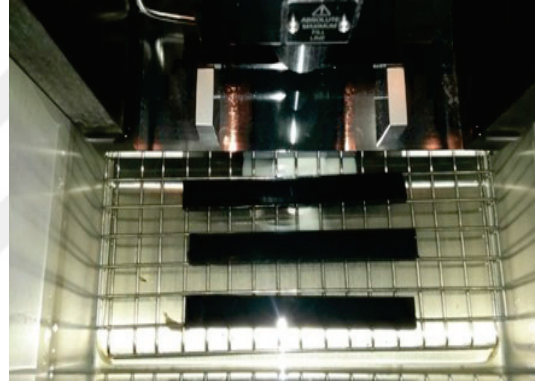
Şekil 31. Yağlanarak döküme hazır hale getirilmiş BBR deney kirişleri



Şekil 32. Bitüm ile doldurulmuş BBR deney kirişleri



Şekil 33. Alkol banyosundaki bitüm kiriş numunesi BBR deneyinde



Şekil 34. BBR deneyi esnasında bitüm deney kirişleri



Şekil 35. BSK marshall numunelerinin hazırlanması



Şekil 36. BSK numunelerinin hazırlanmasında kullanılan ısıtıcı ve karıştırıcı



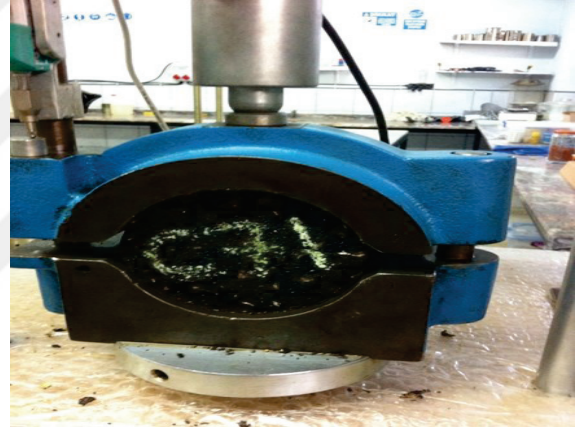
Şekil 37. Kontrol marshall deney numuneleri (21 adet)



Şekil 38. NK modifiye marshall deney numuneleri (21 adet)



Şekil 39. Marshall deneyi düzeltme numuneleri



Şekil 40. Kontrol C71 numunesi marshall stabilite ve akma deneyi esnasında



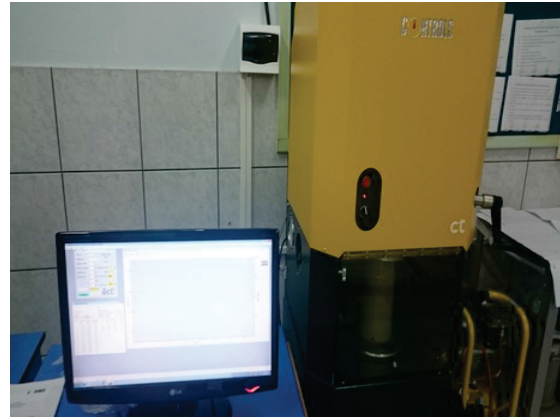
Şekil 41. Marshall stabilite ve akma deneyi ekran görüntüsü



Şekil 42. Marshall düzeltme numuneleri su banyosunda



Şekil 43. Marshall kontrol numuneleri su banyosunda



Şekil 44. Deneylerde kullanılan Controls marka yağurmalı sıkıştırıcı



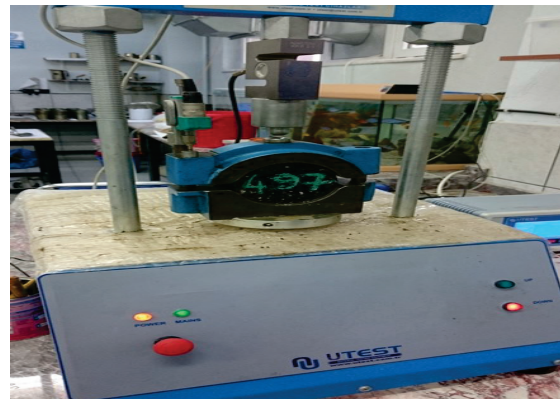
Şekil 45. Etüv içerisinde yaşlanmaya maruz bırakılmış Superpave BSK numuneleri



Şekil 46. Yoğurmalı sıkıştırıcı ile BSK numunesi hazırlanması



Şekil 47. Normal ve NMS modifiye bitüm ile hazırlanmış Superpave BSK numuneleri (16 adet)



Şekil 48. %4.97 NMS modifiye bitüm ile hazırlanan Superpave BSK numunesi

EK AÇIKLAMA-A: BİTÜM VE BSK DENEY FOTOĞRAFLARI



Şekil 49. Kontrol Superpave BSK numuneleri marshall stabilite deneyi sonrasında



Şekil 50. NMS modifiye bitüm ile hazırlanan Superpave BSK numuneleri su banyosunda



Şekil 51. NMS modifiye bitüm ile hazırlanmış Superpave BSK numuneleri (8 adet)



Şekil 52. Superpave BSK numunelerinin kalıptan çıkartılması

ÖZGEÇMİŞ

13 Ekim 1976 tarihinde Ankara’da doğdu. Lise öğrenimini 1994 yılında Bursa Anadolu Lisesinde tamamladı. 1999 yılında 9 Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümünden mezun oldu. 2001 yılında 9 Eylül Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Ulaştırma Bilim dalında Yüksek Lisans Öğrenimini tamamladı. 2001 yılında Hava Kuvvetleri Komutanlığı bünyesinde mühendis subay olarak Teğmen rütbesiyle göreve başladı. Halen Diyarbakır İnşaat Emlak Bölge Başkanlığında Binbaşı rütbesi ile İnşaat Şube Müdürü olarak görev yapmaktadır.

