

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**STİREN-BUTADİEN-STİREN VE UÇUCU KÜLÜN
BİRLİKTE KULLANILMASININ BİTÜMLÜ SICAK
KARIŞIMLARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ**

DOKTORA TEZİ
Yük. Müh. Mustafa Ethem KIZIRGİL

Anabilim Dalı: İnşaat Mühendisliği
Danışman: Yrd.Doç.Dr. Taner ALATAŞ

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 20 Mart 2013

ELAZIĞ-2013

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

STİREN-BUTADİEN-STİREN VE UÇUCU KÜLÜN
BİRLİKTE KULLANILMASININ BİTÜMLÜ SICAK
KARIŞIMLARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

DOKTORA TEZİ
Yük.Müh. Mustafa Ethem KİZİRGİL

(01115203)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 20 Mart 2013

Tezin Savunulduğu Tarih: 12 Nisan 2013

Tez Danışmanı: Yrd.Doç.Dr. Taner ALATAŞ
Diğer Jüri Üyeleri: Prof. Dr. Necati KULOĞLU
Prof.Dr. Mehmet ÇAKIROĞLU
Doç.Dr. Ömer KELEŞOĞLU
Doç. Dr. Baha Vural KÖK

ELAZIĞ-2013

ÖNSÖZ

Doktora eğitimimde gerek ders aşamasında gerekse tez çalışmamın planlaması, yürütülmesi ve tamamlanması aşamalarında değerli katkılarını ve yardımlarını gördüğüm Ulaştırma Anabilim Dalı Başkanımız Sayın Prof.Dr. Necati KULOĞLU'na ve danışman hocam Sayın Yrd.Doç.Dr. Taner ALATAŞ'a saygı, sevgi ve şükranlarımı sunarım.

Tez çalışmalarım sürecinde her türlü bilgi, görüş, destek ve yardımlarını esirgemeyen değerli hocalarım, Sayın Doç.Dr. Baha Vural KÖK ve Sayın Yrd.Doç.Dr. Mehmet YILMAZ'a, laboratuvar çalışmalarında bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım laboratuvar teknisyeni Sayın Seyfettin ÇİÇEK'e ve tezime emeği geçen bütün arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Maddi yönden tezimi destekleyen Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon birimine (FÜBAP) teşekkür ederim.

Mustafa Ethem KİZİRGİL

Elazığ - 2013

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	II
İÇİNDEKİLER.....	III
ÖZET	VII
SUMMARY	VIII
ŞEKİLLER LİSTESİ	IX
TABLolar LİSTESİ	XIII
SEMBOLLER LİSTESİ	XV
KISALTMALAR.....	XVII
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Araştırmanın Önemi ve Konusu.....	1
1.2. Araştırmanın Amacı ve İzlenen Yol.....	5
2. BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIMLAR.....	7
2.1. Bitümlü Sıcak Karışımlarda Kullanılan Agregalar	9
2.1.1. Agregaların Sınıflandırılması	10
2.1.1.1. Agregaların Mineralojik Sınıflandırması	10
2.1.1.2. Boyut Sınıflandırması.....	11
2.1.1.3. Gradasyon Sınıflandırması	15
2.1.1.4. Biçim Sınıflandırması.....	17
2.1.1.5. Yüzey Yapısı Sınıflandırması	17
2.1.1.6. Porozite Sınıflandırması	18
2.1.1.7. Yüzey Alanı ve Boşluk Sınıflandırması	18
2.1.1.8. Özgül Ağırlık Sınıflandırması	18
2.1.2. Agregaların Kaynak Özellikleri	20
2.1.2.1. Aşınma Özelliği (Dayanıklılık).....	20
2.1.2.2. Don Dayanıklılığı (Sağlamlık)	20
2.1.2.3. Yabancı Maddeler	21
2.2. Bitümlü Sıcak Karışımlarda Kullanılan Bağlayıcılar.....	21
2.2.1. Bitümün Kimyasal Bileşimi, Yapısı ve Reolojisi	24
2.2.1.1. Bitümün Kimyasal Bileşimi	24
2.2.1.2. Bitümün Yapısı.....	26
2.2.1.3. Bitümün Reolojisi.....	27
2.2.2. Bitümün Özellikleri.....	27
2.2.2.1. Bitümün Isıya Duyarlılığı.....	29

2.2.2.2.	Viskozitenin Bitümün Performans Özelliklerine Etkisi.....	29
2.2.2.3.	Kohezyonun Bitümün Performans Özelliklerine Etkisi.....	30
2.2.2.4.	Adezyonun Bitümün Performans Özelliklerine Etkisi.....	30
2.2.2.5.	Bitümün Yüzey Gerilimi	31
2.2.2.6.	Bitümün Yaşlanması	31
2.2.3.	Yapım Süresince Bitüm Özelliklerinin Performansa Etkisi.....	33
2.2.3.1.	Karıştırma ve Taşıma	33
2.2.3.2.	Serme ve Sıkıştırma.....	33
2.2.4.	Hizmet Aşamasında Bitüm Özelliklerinin Performansa Etkisi.....	34
2.3.	Çalışmada Kullanılan Deney Yöntemleri.....	34
2.3.1.	Agregalar Üzerinde Uygulanan Deneyler	34
2.3.1.1.	Agregalardan Numune Alınması.....	34
2.3.1.2.	Dane Boyutu (Elek Analizi) Deneyi	35
2.3.1.3.	Aşınma (Los Angeles) Deneyi	35
2.3.1.4.	Hava Tesirlerine Karşı Dayanıklılık (Donma-Çözülme) Deneyi.....	37
2.3.1.5.	Özgül Ağırlık ve Su Emme Deneyi.....	38
2.3.2.	Bağlayıcılar Üzerinde Uygulanan Deney Yöntemleri.....	40
2.3.2.1.	Penetrasyon Deneyi (TS 118 EN 1426)	40
2.3.2.2.	Yumuşama Noktası Deneyi (TS 120 EN 1427)	41
2.3.2.3.	Dönel Viskozimetre Deneyi	42
2.3.2.4.	Dönel İnce Film Halinde Isıtma Deneyi (RTFOT)	43
2.3.3.	Karışımlar Üzerinde Uygulanan Deneyler	45
2.3.3.1.	Karışımların Optimum Bitüm İçeriğinin Belirlenmesi	45
2.3.3.1.1.	Marshall Stabilite Deney Numunelerinin Hazırlanması	45
2.3.3.1.2.	Marshall Stabilite Deneyi (ASTM D 1559-89, TS EN 12697-34).....	46
2.3.3.1.3.	Optimum Bitüm İçeriğinin Belirlenmesi.....	48
2.3.3.1.4.	Çalışmada Kullanılan Bağıntılar	49
2.3.3.2.	Nem Hasarına Karşı Dayanım Deneyi (AASHTO T 283).....	50
2.3.3.3.	İndirekt Çekme Rijitlik Modülü Deneyi (BS DD 213)	52
2.3.3.4.	İndirekt Çekme Yorulma Deneyi (TS EN 12697-24)	54
2.3.3.5.	Dinamik Sünme Deneyi	55
2.4.	Bitümlü Sıcak Karışımlarda Aranacak Özellikler	57
2.4.1.	Bitümlü Sıcak Karışımların Stabilitesi.....	58
2.4.2.	Bitümlü Sıcak Karışımların Rijitliği	59
2.4.3.	Bitümlü Sıcak Karışımların Dayanıklılığı (Durabilitesi)	60
2.4.4.	Bitümlü Sıcak Karışımların Yorulma Mukavemeti	61

2.4.5.	Bitümlü Sıcak Karışımların Esnekliği (Fleksibilitesi)	62
2.4.6.	Bitümlü Sıcak Karışımların Geçirgenliği (Permeabilitesi)	62
2.4.7.	Bitümlü Sıcak Karışımların Kayma Direnci	63
2.4.8.	Bitümlü Sıcak Karışımların İşlenebilirliği	63
2.5.	Esnek Yol Üstyapılarında Karşılaşılan Bozulmalar	64
2.5.1.	Bozulmaya Yol Açan Etkenler	65
2.5.1.1.	Tasarım Hataları	66
2.5.1.2.	Yapım Hataları	66
2.5.1.3.	Bakım Hataları	66
2.5.1.4.	Çevre ve İklim Şartları	67
2.5.1.5.	Trafik Etkileri	67
2.5.2.	Şekil Yönünden Bozulmalar	68
2.5.2.1.	Oturmalar.....	69
2.5.2.2.	Çökmeler ve Çukurlar	70
2.5.2.3.	Tekerlek İzi ve Oluklanmalar.....	72
2.5.2.4.	Ondülasyon ve Yığılmalar.....	74
2.5.2.5.	Kabarmalar ve Bombelikler	74
2.5.2.6.	Lastik Deseni Oluşumu	75
2.5.3.	Çatlamalar	75
2.5.3.1.	Timsah Sırtı ve Yorulma Çatlamaları	76
2.5.3.2.	Büzülme–Rötre Çatlakları	77
2.5.3.3.	Yansıma Çatlakları	77
2.5.3.4.	Kayma Çatlakları.....	78
2.5.3.5.	Kenar Çatlakları	79
2.5.3.6.	Enine ve Boyuna Çatlaklar.....	80
2.5.3.7.	Blok Çatlakları	82
2.5.3.8.	Düşük Sıcaklık Çatlakları.....	83
2.5.4.	Ayrışmalar	85
2.5.4.1.	Soyulmalar.....	85
2.5.4.2.	Sökülmeler.....	86
2.5.4.3.	Çanak Şekli Oluşumlar.....	86
2.5.4.4.	Kusma.....	87
2.5.4.5.	Cilalanma.....	87

3.	BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIMLARDA KATKI KULLANIMI.....	88
3.1.	Bitümlü Sıcak Karışımlarda SBS Kullanımı	94
3.2.	Bitümlü Sıcak Karışımlarda Uçucu Kül Kullanımı	100
3.2.1.	Uçucu Külün Kullanıldığı Yerler	102
3.3.	Bitümlü Sıcak Karışımlarda Diğer Katkıların Kullanımı.....	106
4.	DENEYSEL ÇALIŞMALAR	113
4.1.	Bağlayıcılar Üzerinde Uygulanan Deney Sonuçları	113
4.2.	Agregalar Üzerinde Uygulanan Deney Sonuçları	117
4.3.	Karışımlar Üzerinde Uygulanan Deney Sonuçları	119
4.3.1.	Karışımların Optimum Bitüm İçeriklerinin Belirlenmesi	119
4.3.2.	İndirekt Çekme Rijitlik Modülü Deney Sonuçları	143
4.3.3.	Nem Hasarına Karşı Dayanım (AASHTO T 283) Deney Sonuçları.....	147
4.3.4.	İndirekt Çekme Yorulma Deney Sonuçları	155
4.3.5.	Dinamik Sünme Deney Sonuçları	163
5.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	179
	KAYNAKLAR.....	182
	ÖZGEÇMİŞ	194

ÖZET

Bu tez çalışmasında, bitüm modifikasyonunda Stiren-Butadien-Stiren (SBS) polimeri ve karışım modifikasyonunda uçucu kül birlikte kullanılarak, bitümlü sıcak karışımların mekanik özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Çalışmada, agrega olarak Elazığ Karayazı Bölgesi'nden temin edilen kalker, bitüm olarak da Batman Tüpraş rafinerisinden temin edilen saf bitüm (B 160/220) kullanılmıştır. Bitüm modifikasyonunda Shell firması tarafından üretilen SBS (Kraton D1101) ve karışım modifikasyonunda ise Tunçbilek Termik Santrali'nden temin edilen F tipi uçucu kül bitümlü sıcak karışım numunelerinde katkı maddesi olarak kullanılmıştır. Çalışmada bitüm ağırlığının üç farklı yüzdesinde SBS (%0, %3 ve %6) ve agrega ağırlığının dört farklı yüzdesinde filler yerine uçucu kül (%0, %2, %4 ve %6) kullanılarak 12 farklı karışım değerlendirilmiştir. Karışımlar üzerinde Marshall stabilite ve akma, indirekt çekme rijitlik modülü, nem hasarına karşı dayanım, indirekt çekme yorulma ve dinamik sünme deneyleri uygulanmıştır.

Karışımların Marshall metodu ile belirlenen optimum bitüm içeriğinin, uçucu kül kullanımı ile azaldığı, SBS kullanımı ile ise arttığı tespit edilmiştir. Marshall oranı (MQ) değerlerinden SBS ve uçucu kül kullanımı ile MQ değerlerinin genel olarak arttığı belirlenmiştir. Bütün deneyler göz önünde bulundurulduğunda, hem SBS hem de uçucu kül kullanımı ile karışımların stabilitelerinin, normal sıcaklıklardaki rijitliklerinin, nem hasarına karşı dayanımlarının, yorulma ömürlerinin ve kalıcı deformasyona karşı dayanımlarının arttığı belirlenmiştir. Ayrıca sadece bitüm modifikasyonunda %3 SBS kullanımı ve sadece filler olarak %6 uçucu kül kullanımının benzer sonuçlara sahip olduğu tespit edilmiştir. Bu katkıların birlikte kullanımı ile de olumlu etkilerinin artacağı belirlenmiştir. Katkılar ayrı ayrı değerlendirildiğinde SBS'in uçucu küle göre daha etkin olduğu belirlenmiştir. Ayrıca karışımdaki SBS içeriği arttıkça uçucu külün etkinliğinin azaldığı tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Asfalt, Bitümlü Sıcak Karışım, Stiren-Butadien-Stiren, Uçucu Kül, Modifikasyon, Kalıcı Deformasyon, Yorulma.

SUMMARY

THE EFFECTS OF USING SBS AND FLY ASH TOGETHER ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF HOT MIX ASPHALT

In this thesis, the effects of the using of both Strien-Butadiene-Strien (SBS) polymer in bitumen modification and with fly ash mixture modification on the mechanical properties of hot mix asphalt were researched.

In this study, limestone obtained from the Karayazi Region of Elazig used as aggregates and pure bitumen (B 160/220) provided from refinery Batman TUPRAS used as bitumen. SBS (Kraton D 1101) manufactured by Shell company used in bitumen modification and fly ash provided from Tunçbilek Thermal Power Plant were used in bitumen hot mixtures as additive materials. Three different SBS percentages (0%, 3% and 6%) of bitumen weight and instead of filler four different fly ash percentages (0%, 2%, 4% and 6%) of aggregate weight were used to evaluate 12 different mixtures. Marshall stability and flow, indirect tensile stiffness modulus, resistance against moisture-induced damage, indirect tensile fatigue and finally dynamic creep tests were carried out on the mixture specimens.

It is seen that, the optimum bitumen content of mixtures determined by Marshall method decreased with the using fly ash and increased with using SBS. Generally Marshall ratio (MQ) values increased with using SBS and fly ash. In consideration of all the experiments, both using SBS and fly ash increased the stability of mixtures, stiffness at of normal temperatures, resistance to moisture damage, fatigue life and durability against to permanent deformation. Moreover, only using 3% SBS in bitumen modification and only using 6% fly ash as filler resulted in similar effects. It was determined that, positive effects of these additives increased when using them together. SBS were more effective than fly ash when these additives considered separately. In addition, increasing of SBS content in the mixture decreases the effect of fly ash.

Key Words: Asphalt, Hot Mix Asphalt, Styrene-Butadiene-Styrene, Fly Ash, Modification, Permanent Deformation, Fatigue.

ŞEKİLLER LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1. Agrega gradasyon tipleri	16
Şekil 2.2. Agrega gradasyon tiplerinin görsel dağılımı.....	16
Şekil 2.3. Agreganın özgül ağırlık hesaplamalarında dikkate alınan hacimleri.....	19
Şekil 2.4. Bitüm üretiminin şematik gösterimi	22
Şekil 2.5. Penetrasyon deney aleti.....	41
Şekil 2.6. Yumuşama noktası deney aleti	41
Şekil 2.7. Viskozite değerleri ile karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarının belirlenmesi.....	42
Şekil 2.8. Dönel viskozimetre deney şeması.....	43
Şekil 2.9. Brookfield DV-III ultra dönel viskozimetresi.....	43
Şekil 2.10. Dönel ince film halinde ısıtma deney cihazı (RTFOT) ve şişeleri	44
Şekil 2.11. Marshall stabilite sıkıştırma aleti ve numunelerin kalıptan çıkarılması	45
Şekil 2.12. Marshall stabilite deney numuneleri	46
Şekil 2.13. Marshall stabilite deney aleti ve deney numunelerinin su banyosunda bekletilmesi	48
Şekil 2.14. Piknometre ve vakum cihazı	51
Şekil 2.15. Çekme dayanımı deney düzeneği.....	52
Şekil 2.16. İndirekt çekme rijitlik modülü deney düzeneği	53
Şekil 2.17. İndirekt çekme tekrarlı yorulma deney düzeneği.....	55
Şekil 2.18. Yük tekrar sayısı-şekil değiştirme ilişkisi.....	56
Şekil 2.19. Yük-zaman ve deformasyon-zaman ilişkisi.....	56
Şekil 2.20. Dinamik sünme deney düzeneği	57
Şekil 2.21. Sıcaklık veya yükleme süresinin bir fonksiyonu olarak karışım rijitliği	60
Şekil 2.22. Kaplama pürüzlülüğü.	63
Şekil 2.23. Tekerlek yükünden dolayı oluşan çekme ve basınç gerilmeleri	68
Şekil 2.24. Yüksek şiddette lokal oturmalar	69
Şekil 2.25. Orta şiddette çukur	71
Şekil 2.26. Yüksek şiddette çukur.	71
Şekil 2.27. Zayıf bitümlü tabakada tekerlek izi oluşumu.....	72
Şekil 2.28. Zayıf alt tabakalarda tekerlek izi oluşumu	73
Şekil 2.29. Yüksek şiddette tekerlek izinde oturmalar.....	73
Şekil 2.30. Yorulma çatlakları (timsah sırtı çatlaklar).	76

Şekil 2.31. Orta şiddette timsah sırtı çatlak.....	77
Şekil 2.32. Yansıma çatlağının oluşumu	78
Şekil 2.33. Orta şiddette kenar çatlağı.....	80
Şekil 2.34. Yüksek şiddette enine çatlak	81
Şekil 2.35. Yüksek şiddette boyuna çatlak.....	82
Şekil 2.36. Orta şiddetli blok çatlaklar	83
Şekil 2.37. Yüksek şiddetli blok çatlaklar	83
Şekil 2.38. Düşük sıcaklık çatlağı şekilleri	84
Şekil 2.39. Düşük sıcaklık çatlağının büyüme aşaması.....	84
Şekil 2.40. Orta şiddette soyulma.....	86
Şekil 3.1. Bitümün statik yükler karşısındaki davranışı.	89
Şekil 3.2. Bitümün dinamik yükler karşısındaki davranışı.	89
Şekil 3.3. SBS türü polimerlerin yapısı.....	94
Şekil 3.4. Bitümle karışım sıcaklığında ve düşük sıcaklıklarda SBS'in yapısı.....	95
Şekil 4.1. Modifiye bağlayıcı hazırlama cihazı ve karıştırma aparatı	114
Şekil 4.2. Bitümlü bağlayıcıların karıştırma ve sıkıştırma sıcaklık aralıkları	116
Şekil 4.3. Agrega gradasyonunun değişimi.....	118
Şekil 4.4. B 160/220 bitümü ile hazırlanan numunelerin dizayn parametrelerinin bitüm içeriği ile değişimi.....	121
Şekil 4.5. B 160/220 bitümü ve filler yerine %6 oranında uçucu kül kullanılan numunelerin dizayn parametrelerinin bitüm içeriği ile değişimi	123
Şekil 4.6. MB ₃ SBS bitümü ve filler yerine kalker kullanılan numunelerin dizayn parametrelerinin bitüm içeriği ile değişimi	125
Şekil 4.7. MB ₃ SBS bitümü ve filler yerine %6 oranında uçucu kül kullanılan numunelerin dizayn parametrelerinin bitüm içeriği ile değişimi	127
Şekil 4.8. MB ₆ SBS modifiye bitümü ve filler yerine kalker kullanılan numunelerin dizayn parametrelerinin bitüm içeriği ile değişimi	129
Şekil 4.9. MB ₆ SBS modifiye bitümü ve filler yerine %6 oranında uçucu kül kullanılan numunelerin dizayn parametrelerinin bitüm içeriği ile değişimi	131
Şekil 4.10. Optimum bitüm içeriği değerlerinin SBS ve UK içeriği ile değişimi.....	138
Şekil 4.11. Karışımların pratik özgül ağırlık değerlerinin SBS ve UK içeriği ile değişimi	138
Şekil 4.12. Karışımların boşluk oranlarının SBS ve UK içeriği ile değişimi.....	138

Şekil 4.13. Karışımlardaki agregalar arası boşluk oranlarının SBS ve UK içeriği ile değişimi	139
Şekil 4.14. Karışımların bitümle dolu boşluk oranlarının SBS ve UK içeriği ile değişimi	139
Şekil 4.15. Karışımların Stabilité değerlerinin SBS ve UK içeriği ile değişimi	139
Şekil 4.16. Karışımların akma değerlerinin SBS ve UK içeriği ile değişimi.....	140
Şekil 4.17. Karışımların Marshall oranı değerlerinin SBS ve UK içeriği ile değişimi	140
Şekil 4.18. Karışımların ITSM değerleri.....	146
Şekil 4.19. Koşullandırılmamış numunelerin TS değerlerinin SBS ve uçucu kül içeriği ile değişimi	153
Şekil 4.20. Koşullandırılmış numunelerin TS değerlerinin SBS ve uçucu kül içeriği ile değişimi	154
Şekil 4.21. Karışımların TSR değerlerinin SBS ve uçucu kül içeriği ile değişimi	155
Şekil 4.22. Saf karışımın her üç numunesinin deformasyon-yük tekrar sayısı ilişkisi	156
Şekil 4.23. B 160/220 ile hazırlanan karışımların deformasyon-yük tekrar sayısı ilişkisi	157
Şekil 4.24. MB _{%3SBS} ile hazırlanan karışımların deformasyon-yük tekrar sayısı ilişkisi..	157
Şekil 4.25. MB _{%6SBS} ile hazırlanan karışımların deformasyon-yük tekrar sayısı ilişkisi..	158
Şekil 4.26. Uçucu kül içermeyen karışımların deformasyon-yük tekrar sayısı ilişkisi.....	159
Şekil 4.27. Filler olarak %2 oranında uçucu kül içeren karışımların deformasyon-yük tekrar sayısı ilişkisi	159
Şekil 4.28. Filler olarak %4 oranında uçucu kül içeren karışımların deformasyon-yük tekrar sayısı ilişkisi	160
Şekil 4.29. Filler olarak %6 oranında uçucu kül içeren karışımların deformasyon-yük tekrar sayısı ilişkisi	160
Şekil 4.30. Karışımların 4 mm deformasyondaki yük tekrar sayıları	161
Şekil 4.31. Karışımların 2037 yük tekrarındaki deformasyon miktarları	162
Şekil 4.32. Saf karışımın her üç numunesinin ϵ_c -yük tekrar sayısı ilişkisi	164
Şekil 4.33. B 160/220 ile hazırlanan karışımların ϵ_c -yük tekrar sayısı ilişkisi.....	164
Şekil 4.34. B 160/220 ile hazırlanan karışımların E_c -yük tekrar sayısı ilişkisi.....	165
Şekil 4.35. MB _{%3SBS} bitümü ile hazırlanan karışımların ϵ_c -yük tekrar sayısı ilişkisi.....	165
Şekil 4.36. MB _{%3SBS} bitümü ile hazırlanan karışımların E_c -yük tekrar sayısı ilişkisi.....	166
Şekil 4.37. MB _{%6SBS} bitümü ile hazırlanan karışımların ϵ_c -yük tekrar sayısı ilişkisi.....	167
Şekil 4.38. MB _{%6SBS} bitümü ile hazırlanan karışımların E_c -yük tekrar sayısı ilişkisi.....	167

Şekil 4.39. Uçucu kül içermeyen karışımların ϵ_c -yük tekrar sayısı ilişkisi.....	168
Şekil 4.40. Filler olarak %2 oranında uçucu kül içeren karışımların ϵ_c -yük tekrar sayısı ilişkisi.....	168
Şekil 4.41. Filler olarak %4 oranında uçucu kül içeren karışımların ϵ_c -yük tekrar sayısı ilişkisi.....	169
Şekil 4.42. Filler olarak %6 oranında uçucu kül içeren karışımların ϵ_c -yük tekrar sayısı ilişkisi.....	169
Şekil 4.43. Uçucu kül içermeyen karışımların E_c -yük tekrar sayısı ilişkisi	170
Şekil 4.44. Filler olarak %2 oranında uçucu kül içeren karışımların E_c -yük tekrar sayısı ilişkisi.....	170
Şekil 4.45. Filler olarak %4 oranında uçucu kül içeren karışımların E_c -yük tekrar sayısı ilişkisi.....	171
Şekil 4.46. Filler olarak %6 oranında uçucu kül içeren karışımların E_c -yük tekrar sayısı ilişkisi.....	171
Şekil 4.47. Karışımların %2 ϵ_c değerindeki yük tekrar sayıları	172
Şekil 4.48. Karışımların %3 ϵ_c değerindeki yük tekrar sayıları	174
Şekil 4.49. Karışımların 1000 yük tekrar sayısındaki ϵ_c değerlerinin yük tekrar sayıları .	175
Şekil 4.50. Karışımların 1000 yük tekrar sayısındaki E_c değerlerinin yük tekrar sayıları	176
Şekil 4.51. Karışımların 2000 yük tekrar sayısındaki ϵ_c değerlerinin yük tekrar sayıları .	177
Şekil 4.52. Karışımların 2000 yük tekrar sayısındaki E_c değerlerinin yük tekrar sayıları	178

TABLÖLAR LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1.1. Satıl cinsine göre yol ağı	1
Tablo 1.2. Bölünmüş yollar	1
Tablo 1.3. Bazı ülkelerin yol ağı karşılaştırması	2
Tablo 2.1. Mineral agrega cinslerinin özellikleri	9
Tablo 2.2. Kaba agreganın özellikleri	13
Tablo 2.3. İnce agreganın özellikleri	14
Tablo 2.4. Mineral fillerin gradasyon limitleri	15
Tablo 2.5. Aşınma deneyinde kullanılacak çelik küre özellikleri	36
Tablo 2.6. Aşınma deneyi için numune tipleri ve numune miktarları	36
Tablo 2.7. Donma deneyi için gerekli numune miktarı	38
Tablo 2.8. Donma deneyi için gerekli soğutma ve donma süreleri	38
Tablo 2.9. Özgül ağırlık tayini için gerekli deney numunesi miktarları	40
Tablo 3.1. BSK katkı maddelerinin genel sınıflandırılması	92
Tablo 3.2. Farklı tipteki modifiyerlerin sağladıkları faydalar	93
Tablo 3.3. KRATON D 1101 ve D 1192 SBS türlerinin özellikleri.....	97
Tablo 4.1. Saf bağlayıcının deney sonuçları.....	113
Tablo 4.2. KRATON D 1101 Polimerinin özellikleri.....	114
Tablo 4.3. Modifiye bağlayıcı deney sonuçları	115
Tablo 4.4. Dönel viskozite deney sonuçları.....	116
Tablo 4.5. Çalışmada kullanılan agregaların fiziksel özellikleri	117
Tablo 4.6. Agrega gradasyonu	117
Tablo 4.7. Uçucu külün kimyasal bileşimi ve fiziksel özellikleri	118
Tablo 4.8. B 160/220 bitümü ile hazırlanan BSK numunelerinden elde edilen sonuçlar.	120
Tablo 4.9. B 160/220 bitümü ve filler olarak %6 oranında uçucu kül içeren BSK numunelerinden elde edilen sonuçlar	122
Tablo 4.10. MB ₃ SBS modifiye bitümü ve filler olarak kalker kullanılan BSK numunelerinden elde edilen sonuçlar.....	124
Tablo 4.11. MB ₃ SBS modifiye bitümü ve filler olarak %6 oranında uçucu kül kullanılan BSK numunelerinden elde edilen sonuçlar	126
Tablo 4.12. MB ₆ SBS modifiye bitümü ve filler olarak kalker kullanılan BSK numunelerinden elde edilen sonuçlar	128

Tablo 4.13. MB%6SBS modifiye bitümü ve filler olarak %6 oranında uçucu kül kullanılan BSK numunelerinden elde edilen sonuçlar	130
Tablo 4.14. Karışımların optimum bitüm içeriklerinin tespitinde kullanılan değerler	132
Tablo 4.15. Karışımların optimum bitüm içerikleri.....	132
Tablo 4.16. Optimum bitüm içeriklerinde hazırlanan numunelerden elde edilen sonuçlar	133
Tablo 4.17. Karışımlardan elde edilen değerler ve şartname kriterleri.....	137
Tablo 4.18. Karışımların ITSM deney sonuçları	144
Tablo 4.19. Karışımların MI _{ITSM} değerleri	147
Tablo 4.20. Koşullandırılmamış numunelerin çekme dayanımı oranı deney sonuçları ...	149
Tablo 4.21. Koşullandırılmış numunelerin çekme dayanımı oranı deney sonuçları	151
Tablo 4.22. Yorulma deney sonuçları.....	161
Tablo 4.23. Dinamik sünme deney sonuçları	172

SEMBOLLER LİSTESİ

σ	: Normal gerilme (Çekme gerilmesi)
ϵ	: Eksenel şekil değiştirme (deformasyon)
t	: Yükleme süresi
c	: Düzeltme katsayısı
h	: Numune yüksekliği
D_T	: Bitümlü karışımının boşluksuz maksimum özgül ağırlığı (kN/cm^3)
W_a	: Agreganın ağırlığının yüzdesi olarak bitüm içeriği (%)
W_b	: Karışım ağırlığının yüzdesi olarak bitüm içeriği (%)
G_e	: Agreganın efektif özgül ağırlığı (kN/cm^3)
G_{sb}	: Agreganın hacim özgül ağırlığı (kN/cm^3)
G_b	: Bitümün özgül ağırlığı (kN/cm^3)
WMA	: Agregalar arası boşluk yüzdesi (%)
D_p	: Sıkıştırılmış karışımın hacim özgül ağırlığı (kN/cm^3)
V_h	: Toplam hacmin yüzdesi olarak sıkıştırılmış karışımdaki hava boşluğu (%)
V_f	: Asfaltla dolu boşluk yüzdesi (%)
J	: Absorbe su hacmi (cm^3)
B'	: Vakum işleminden sonra numunenin doymuş kuru yüzey ağırlığı (gr)
B	: Vakum işleminden önce numunenin doymuş kuru yüzey ağırlığı (gr)
S'	: Doymuşluk derecesi (%)
I	: Hava boşluğu hacmi (cm^3)
V	: Numune hacmi (cm^3)
V_a	: Hava boşluğu yüzdesi (%)
TS	: Çekme dayanımı (kPa)
P_{mak}	: Kırılmaya neden olan maksimum yük (kN)
d	: Numune çapı (m)
t	: Ortalama numune yüksekliği (m)
TSR	: Çekme dayanımı oranı
$TS_{yaş}$	: Koşullandırılmış numunelerin çekme dayanımı değeri
TS_{kuru}	: Koşullandırılmamış numunelerin çekme dayanımı değeri
S_m	: İndirekt çekme rijitlik modülü
F	: İndirekt çekme rijitlik modülü deneyinde maksimum dikey yük (N)

L	: Ortalama numune kalınlığı (mm)
R	: Poisson oranı
N_f	: Yorulma ömrü (Yük tekrar sayısı)
ϵ_0	: Başlangıç şekil değıştirmesi
S₀	: Karışımın başlangıç rijitliği
ϵ_c	: Eksenel birim şekil değıştirme
E_c	: Sünme rijitliği modülü (Mpa)
G	: Numunenin başlangıç yüksekliği (mm)
L1	: LVDT'nin başlangıç referans deplasmanı (mm)
L3n	: n darbe sayısındaki deplasman (mm)
τ	: Kayma gerilmesi
c	: Kohezyon
θ	: Agrega daneleri arasındaki içsel sürtünme açısı
PI	: Penetrasyon İndeksi
P₂₅	: Bitümün 25 ⁰ C'deki penetrasyon değeri
T_{YN}	: Yumuşama noktası

KISALTMALAR

AASHTO	: American Association of State Highway and Transportation Officials (Amerikan Devlet Karayolu ve Ulaştırma Birliği)
AC	: Asphalt Concrete (Asfalt Çimentosu)
ASTM	: American Society for Testing and Materials (Amerikan Malzeme ve Test Birliği)
BBR	: Bending Beam Rheometer (Kiriş Eğme Reometresi)
BSK	: Bitümlü Sıcak Karışım
CBR	: California Taşıma Oranu
DSR	: Dynamic Shear Rheometer (Dinamik Kayma Reometresi)
ETDY	: Eşdeğer Standart Tek Dingil Yüğü
EVA	: Etilen-Vinil-Asetat
İÇYD	: İndirekt Çekme Rijitlik Modülü
ITSM	: Indirect Tensile Stiffness Modulus (İndirekt Çekme Rijitlik Modülü)
KGM	: Karayolları Genel Müdürlüğü
KK	: Kızdırma Kaybı
LVDT	: Düşey Deformasyon Ölçme Sensörü
MB	: Modifiye Bitüm
MQ	: Marshall Quotient (Marshall Oranı)
ÖA	: Özgöl Ağırlık
ÖYA	: Özgöl Yüzey Alanı
Pa.s	: Pascal-saniye
PAV	: Pressure Aging Vessel (Basınçlı Yaşlandırma Aleti)
PI	: Penetrasyon İndeksi
PMB	: Polimer Modifiyeli Bitüm
RTFOT	: Rolling Thin Film Oven Test (Dönel İnce Film Halinde Isıtma Deneyi)
RV	: Rotational Viscometer (Dönel Vizkozimetre)
SBS	: Stiren-Butadien-Stiren Polimer
SUPERPAVE	: Superior Performing Asphalt Pavement (Yüksek Performanslı Asfalt Kaplama)
TSE	: Türk Standartları Enstitüsü
TSR	: Çekme Dayanımı Oranı

TÜİK	: Türkiye İstatistik Kurumu
TÜBİTAK	: Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu
TÜPRAŞ	: Türkiye Petrol Rafinerileri Anonim Şirketi
UMATTA	: Universal Material Testing Apparatus (Üniversal Malzeme Deney Aleti)

1. GİRİŞ

1.1. Araştırmanın Önemi ve Konusu

Bir ülkenin kalkınmasında karayolu ulaşım kolaylığı önemli bir etkidir. Teknolojide yaşanan önemli gelişmelerle beraber insanların hayat standartları yükselmiş, karayollarındaki konforlu ve güvenli sürüş talepleri önemli ölçüde artmıştır. Ülke geneline dengeli şekilde yayılmış, fiziki ve geometrik standartları yüksek bir yol ağının temin edilmesi çevre ve ülke için çok yönlü kalkınma bakımından son derece önemli ve gereklidir.

Ekonomik kalkınmanın ve refahın gelişmesinde önemli bir ölçü olan karayolu taşımacılığının, ülkemizde ulaştırma sektörü içindeki payı giderek artmaktadır. KGM verilerine göre ülkemizdeki karayollarının satıh cinsine göre dağılımı Tablo 1.1’de, bölünmüş yolların miktarları Tablo 1.2’ de verilmiştir.

Tablo 1.1. Satıh cinsine göre yol ağı (URL-1, 2011).

Satıh Cinsine Göre Yol Ağı (km) (01.01.2011 tarihi itibarıyla)							
	Asfalt Betonu	Sathi Kaplama	Parke	Stabilize	Toprak	Diğer Yollar	TOPLAM
Otoyol	2 080	-	-	-	-	-	2 080
Devlet Yollar	8 758	22 146	75	162	47	207	31 395
İl Yolları	1 439	26 783	137	1 152	735	1 144	31 390
Toplam	12 277	48 929	212	1 314	782	1 351	64 865

Tablo 1.2. Bölünmüş yollar (URL-1, 2011).

Bölünmüş Yollar (km) 01.01.2011	
Otoyollar	2 080
Devlet Yolu	15 788
İl Yolu	996
Toplam	18 863

Türkiye İstatistik Kurumu verilerine göre Türkiye’de karayolu taşımacılığının payı 1970 yılında yük taşımacılığında % 61, yolcu taşımacılığında % 91 iken, 2003 yılında yük taşımacılığında %92, yolcu taşımacılığında %95 olmuştur. 1992’den günümüze otomobil sayısı % 154, ağır taşıt sayısı ise %183 artmıştır (URL-2, 2011). Ayrıca ülkemizde araç sayısı açısından kaydedilen önemli artış ile birlikte 1950 yılında trafiğe çıkan taşıt sayısı 36028 iken bu sayı 2010 yılında 15.095.603 olmuştur (URL-2, 2011). Tablo 1.3’ de bazı ülkelerin yol ağı karşılaştırması görülmektedir.

Tablo 1.3. Bazı ülkelerin yol ağı karşılaştırması (km²’ye düşen yol ağı) (URL-1, URL-2, URL-3, 2011).

Ülke	Türkiye	İngiltere	Fransa	Almanya	İtalya	İspanya
Karayolu Uzunluğu (km)	426900	174700	396000	231500	175500	110500
km/km²	0,524	0,713	0,713	0,648	0,582	0,219
Kaynak: 2006 yılı ERF Avrupa yol istatistikleri yayını (Veri yılı: 2005)						

Bu verilerden de anlaşılacağı üzere kentler arası yolcu ve yük taşımacılığında en büyük payı karayolu sistemi üstlenmekte ve bu pay, her geçen gün hızla artış göstermektedir. Bu gerçekler gelişmekte olan ülkemizde karayolu yapımında ve mevcut yolların standartlarının iyileştirilmesinde, kapasitelerinin artırılmasında daha ekonomik çözümler geliştirme ihtiyacını doğurmuştur.

Yapım maliyeti yüksek olan karayollarının ülke kalkınmasındaki rolü ve her geçen gün artan taşıt sayısı sebebiyle fazla sayıda trafiğe maruz kalması, teknolojik gelişmeler sonucu araçların artan yük taşıma kapasiteleri ve çevresel etkiler günümüzde mevcut kullanılan malzeme tipinin ve bunların tasarımının yeterliliğinin sorgulanmasına yol açmıştır. Bu yüzden araştırmacıları yeni teknikler ve gelişmeler ortaya koymaya zorlamış, daha gerçekçi yaklaşımların ortaya konulması bakımından günümüzün nüfus, trafik ve çevre koşullarına uygun, yeni projelerin hazırlanması gündeme gelmiştir.

Karayolu inşasına, bakım ve onarımına harcanan maliyetlerin büyük olması; yüksek kalitede, uzun ömürlü yol inşaatı yapımının önemini açıkça ortaya koymaktadır. İyi bir üstyapı tasarım sürecinde, tüm malzemelerin mekanik özellikleri doğru bir şekilde belirlenmelidir. Yol üstyapı inşasında kullanılan granüler malzemelerin özellikleri hakkındaki mevcut bilgiler günümüzde hala sınırlıdır. Bu malzemelerin mühendislik özelliklerinin belirlenmesi için kullanılan deney yöntemleri birtakım ampirik temellere dayanmaktadır. Bu şekilde elde edilen parametrelerin günümüzün modern mekanistik

üstyapı tasarım süreçlerinde bir girdi olarak kullanılması gerçekçi bir yaklaşım değildir. Ülkemizde de son yıllarda mekanistik tasarım sürecine geçme çalışmaları yapılmaktadır. Bu bağlamda, granüler malzemelerin trafik yükleri altındaki mekanik özelliklerinin belirlenmesi oldukça önem kazanmıştır (Yılmaz, 2008).

Son yıllarda dünyanın her yerinde karayollarına olan talebin hızlı bir biçimde arttığı, trafik ağırlaştığı, dingil yükleri ve lastik basınçları yükseldiği gözlemlenmiştir. Bu sebeplerle, saf bitüm ve yoğun gradasyonlu klasik asfalt betonunun ihtiyaca cevap veremediği ve beklenen performansı gösteremediği belirlenmiştir. Bu yetersizlik esnek üstyapılarda tekerlek izi oluşumunun (kalıcı deformasyon), yorulma çatlaklarının ve termal çatlakların hızlanması şeklinde ortaya çıkmıştır (Işıkyakar, 2009).

Türkiye'de yapılan bazı şehirlerarası yollar ve şehir içi yollarda kaplama olarak kullanılan yoğun gradasyonlu asfalt betonu karışımlar, malzeme kalitesi ve seçiminin hatalı olması, karışım tasarımının yetersiz olması ve yapım aşamalarındaki hatalar sebebiyle beklenen performans ömrünü göstermemektedir. Bunların yanı sıra otomotiv sanayisinde meydana gelen gelişmeler sonucu geleneksel kaplamalar yeteri kadar ihtiyaca yanıt veremediğinden tüm dünyada yeni arayışlar içerisine girilmiştir. Bu gelişmeler, mevcut kaplama karışımlarının özelliklerinin çeşitli katkı malzemeleri kullanılarak iyileştirilmesi, performans özelliklerinin dikkate alındığı yeni tasarım yöntemlerinin geliştirilmesi ve geleneksel kaplama karışımlarının yanı sıra agrega gradasyonunun değiştirilerek yeni kaplama tiplerinin uygulanmasıdır. Artan trafik hacimleri ve dingil yüklerindeki artışlar nedeniyle, bitümlü sıcak karışımların (BSK), bilhassa tekerlek izi gibi kalıcı deformasyonlara ve termal çatlamalara karşı direncinin geliştirilmeye ihtiyacı vardır. Bu amaçla, bitümün mekanik özelliklerini geliştirmek üzere bir takım polimerlerin kullanımı başarılı biçimde gerçekleştirilmiştir (Adedeji ve diğ., 1996; Lu ve Isacsson, 2001).

BSK'ların maliyetinin yüksek olması nedeniyle, BSK'yı oluşturan bitüm ve agreganın özellikleri, yolun öngörülen ömür ve konfor seviyesinin sağlanması bakımından büyük önem taşımaktadır. Bu karışımlarda ağırlıkça, agrega %94–96 oranında, bitüm ise %4–6 oranında yer alır. Ancak bağlayıcı oranının agregaya göre çok az olmasına rağmen, kaplamanın maliyeti ve performansı üzerinde çok büyük önemi bulunmaktadır. Viskoelastik davranış gösteren ve termoplastik bir malzeme olan bitüm, trafik yükleri altında yükün şiddetine, yükleme zamanına ve sıcaklığına bağlı olarak farklı davranışlar göstermektedir. Bu reolojik özelliğinden dolayı bitümün yapısal ve fiziksel özellikleri ile

bağlayıcı olarak içerisinde önemli bir rol oynadığı bitümlü karışımın davranışları arasındaki ilişkinin iyi bilinmesi gerekmektedir.

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 arttırmak amacıyla birçok ülkede, bitümlü bağlayıcılara veya karışımlara çeşitli katkı maddeleri eklenerek modifiye bitümler veya karışımlar elde edilmektedir (Francken, 1998; Nicholls, 1998).

Bitümlü bağlayıcılara modifiye edici katkı maddelerinin kullanım amacı, bitümlü bağlayıcı ve karışımların davranışlarının iyileştirilmesidir. Son yıllarda üzerinde önemle durulan modifiye bitüm ve modifiye karışım çalışmaları, farklı katkı maddelerinin BSK üzerindeki performans etkilerini belirleme konusunda yoğunlaşmıştır. Günümüzde esnek üstyapı kaplamalarında kullanılmak üzere değişik modifiye edici katkı maddeleri kullanılmaktadır. Bitüm ve bitümlü sıcak karışımların (BSK) modifiye edilmeleriyle yol üstyapılarının oluklanma, sökölme, ondülasyon düşük sıcaklık çatlakları vb. olumsuzluklara karşı dayanıklı olmaları amaçlanmaktadır (Sönmez ve diğ., 2005).

Üstyapı kaplamasından beklenen, ancak klasik bağlayıcılar ile sağlanamayan özelliklerin sağlanabilmesi, günümüz teknolojik imkânlarının kullanılmasıyla bağlayıcının ya da karışımın katkı maddeleriyle özelliklerinin iyileştirilmesi sonucunda mümkün olabilmektedir. Modifikasyonda kullanılan katkı maddeleri, fiziksel ve kimyasal yapılarına, modifikasyon tipine, bağlayıcı ya da karışım üzerindeki etkilerine göre çeşitli şekillerde sınıflandırılabilir. Son yıllarda yapılan çalışmalarda polimer esaslı katkı maddelerinin yoğun bir şekilde kullanıldığı, katkı maddelerinin polimer olanlar ve olmayanlar olmak üzere iki gruba ayrıldığı görülmektedir. Karayollarımızda iklim ve trafik şartları altında meydana gelen bozulmaları geciktirerek, bakım ve yenileme ihtiyacını daha seyrek aralıklarla yapılabilecek hale getirilmesinde çözüm oluşturabileceği düşünülen “Modifiye Bitüm” konusu, petrolde dışa bağımlı olan ülkemiz için çok önemli bir hale gelmektedir. Bu amaçla ülkemizde birçok çalışmalar yapılmaya başlanmış ve KGM tarafından “Modifiye Bitüm Teknik Şartnamesi” hazırlanarak yayınlanmıştır (Geçkil, 2008; Malkoç ve Önal, 1998).

Karışıma eklenen katkı maddeleri genellikle filler malzemesi olarak kullanılmaktadır. Uçucu kül, kireç, siyah karbon, atık lastik, atık mermer gibi malzemeler BSK’larda filler olarak kullanılabilen katkı maddeleridir (Francken, 1998). Kök ve Yılmaz

mineral filler yerine karışımın ağırlıkça %2'si oranında kireç kullanmış, sonuçta kirecin BSK'ların nem hasarına karşı dayanımını önemli miktarda arttırdığını tespit etmişlerdir (Kök ve Yılmaz, 2009). Terzi ve Karaşahin, atık mermer tozunu BSK numunelerde filler olarak denemiş ve mermer tozunun filler malzemesi olarak kullanılabileceğini belirlemişlerdir (Karaşahin ve Terzi, 2007). Cao, atık lastiği doğrudan karışıma eklemiş, kauçuk ve siyak karbon muhteva eden atık lastiğin bitümlü sıcak karışımların yüksek sıcaklıklarda kalıcı deformasyona düşük sıcaklıklarda ise çatlak oluşumuna karşı olumlu etkiye sahip olduğunu belirlemiştir (Cao, 2007). Tapkın, farklı termik santrallerden temin ettiği uçucu kül filler olarak kullanmış ve uçucu külün BSK'ların mekanik özelliklerini iyileştirdiğini belirlemiştir (Tapkın, 2009).

Uçucu kül, termik enerji santralleri içinde öğütülmüş kömürün yanmasıyla ortaya çıkan bir üründür. Baca gazları atmosfere bırakılmadan önce bu gazlar içindeki ince tanelerin toz toplama sistemi tarafından toplanmasıyla elde edilir. Uçucu kül rutubetli ortamlarda kalsiyum iyonları ile reaksiyona girerek silikat hidrate oluşturan yarı kararlı alümin silikatlar içerir. Dünyadaki uçucu kül üretimi yılda yaklaşık 450 milyon tondur ancak toplam uçucu kül miktarının sadece %6 sı çimento ve beton karışımlarında puzolan olarak kullanılmaktadır. Türkiye' de kömür yakan 11 enerji santrali bulunmaktadır. Ülkemizde yıllık uçucu kül üretimi yaklaşık 15 milyon ton civarındadır.

BSK'ların mekanik özellikleri üzerinde olumlu etkisi olduğu çeşitli çalışmalarla belirtilen uçucu külün, SBS ile birlikte kullanılmasıyla BSK'ların mekanik özelliklerine daha etkin bir katkı sağlayacağı düşünülmektedir. Bu düşünce doğrultusunda, tez çalışmasında SBS ve uçucu kül birlikte kullanılacaktır.

1.2. Araştırmanın Amacı ve İzlenen Yol

Bu tez çalışmasının amacı, Stiren Butadien Stiren (SBS) modifiyeli bitüm ile birlikte fillerin bir kısmı yerine uçucu kül kullanılmasıyla bitümlü sıcak karışımların mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini incelemektir.

Çalışmada öncelikle TÜPRAŞ rafinerisinden temin edilen saf bitüm, standart bağlayıcı deneylerine (penetrasyon, yumuşama noktası, özgül ağırlık ve dönel viskozimetre) tabi tutularak, bitümlü bağlayıcının kullanılabilişliği ve reolojik davranışı tespit edilmiştir.

SBS, bitüme farklı oranlarda (ağırlıkça %0, %3 ve %6) katılarak elde edilen modifiye bağlayıcılar üzerinde bitüm deneyleri yapılarak SBS'nin bitümlü bağlayıcının reolojik özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir.

Agrega malzemesi olarak Elazığ Karayazı Bölgesi'nden temin edilen kalker kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan agrega malzemesinin fiziksel özellikleri tespit edilmiştir. Agrega karışım oranlarını tespit etmek için üç gradasyon belirlenmiş ve şartname kriterlerini sağlayan en uygun gradasyon, karışım gradasyonu olarak seçilmiştir.

Tez çalışmasında Tunçbilek Termik Santrali'nden temin edilen uçucu kül, bitümlü sıcak karışım numunelerinde katkı maddesi olarak kullanılmıştır. Tunçbilek Termik Santrali uçucu külü, mineral filler malzemesi yerine karışımın ağırlıkça farklı oranlarında (%0, %2, %4 ve %6) kullanılmıştır. Saf ve farklı uçucu kül oranları için optimum bitüm içerikleri tespit edilmiştir. Uçucu küllü karışımlar hem saf hem de farklı oranlarda SBS içeren modifiye bitümlerle hazırlanmıştır.

Optimum bitüm içeriklerinde her bir deney için üç numune hazırlanmıştır. Numuneler üzerinde;

- Marshall stabilite ve akma deneyi (ASTM D-1559),
- 5°C ve 25°C'de deformasyon kontrollü indirekt çekme rijitlik modülü deneyi (BS DD 213) (UMATTA deney aleti ile),
- 25°C'de deformasyon kontrollü indirekt çekme yorulma deneyi (TS EN 12697-24) (UMATTA deney aleti ile),
- 50°C'de dinamik sünme deneyi (ELE, 1994),
- Nem hasarına karşı dayanım deneyi (AASHTO T 283) yapılmıştır.

Yukarıdaki deneylerden elde edilen olumlu sonuçlar, SBS ve uçucu külün bitümlü sıcak karışımlarda birlikte katkı maddesi olarak kullanılabilirliğini ortaya koymuştur. SBS ve uçucu külün bitümlü sıcak karışımlarda birlikte katkı maddesi olarak kullanımının bitümlü sıcak karışımların performansını arttırarak pahalı ve zaman alan yeniden kaplama yapımlarını veya rehabilitasyonları geciktireceği, bu sayede ekonomik açıdan fayda sağlayacağı düşünülmektedir.

2. BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIMLAR

Günümüzde karayolu üstyapıları esnek kaplama olarak projelendirilmekte ve yapılmaktadır. Esnek üstyapılarda, alttemel ve temel tabakaları yapılması sayesinde üst yapının yük taşıma kabiliyetini arttırılmakta, deformasyonlara karşı direnci arttırılmakta ve drenaj imkanı sağlanmaktadır. Kaplama tabakası ise agrega ve bitümün belli oranlarda karışımından oluştuğu için boşluksuz ve düzgün bir yuvarlanma yüzeyi elde etmek için yapılır. Ayrıca kaplama tabakası taşıt trafiğinden gelen yüklere doğrudan maruz kaldığından, trafiğin aşındırıcı etkisine ve değişik iklim koşullarının ayrıştırıcı etkilerine karşı direnç göstermek ve konforlu bir sürüş imkanı sağlamak amacıyla bitümlü sıcak karışım olarak yapılması tercih edilmektedir.

Bitümlü sıcak karışım, bitüm ve agreganın (kırmı taş, cüruf, çakıl, kum) uygun oranlarda karışımından meydana gelmektedir. Bitümlü karışımın kohezyonu bitümlü malzemeler tarafından sağlanırken, agregalar karışımın içsel sürtünme direncini ve stabilitesini sağlamaktadır. Karışımındaki bağlayıcı maddenin en önemli görevi agrega danelerini birbirine bağlayarak trafik etkisi altında dağılmasını önlemek, karışımın stabilitesini sağlamak ve agrega daneleri arasındaki boşlukları doldurarak geçirimsizliği sağlamaktır (Tunç, 2001). BSK'lar yapım maliyeti fazla olmasına karşın birçok faydalı özelliklere sahiptir.

BSK'lar, özellikle proje ömrü içinde toplam standart dingil yükü sayısı 3×10^6 'dan fazla olan yüksek standartlı yol kaplamalarında kullanılmaktadır. Bitümlü sıcak karışım, kırılmış, yıkanmış ve elenmiş kaba agrega, ince agrega ve mineral fillerin şartnamelerde belirtilen gradasyon limitlerine uygun olarak uygun bir bitümlü bağlayıcı oranı ile bir karışım tesisinde (plentte) belirli sıcaklıkta homojen olarak belli sürelerde karıştırılması ile imal edilerek uygulama alanına taşınır ve sonra belirli sıcaklıkta sıkıştırılarak kaplama inşaatı gerçekleştirilir. Agregas-asfalt karışımının yol kaplamasında kullanılabilmesi için dizayn esnasında stabilite, durabilite, esneklik, yorulma ve kayma direnci, geçirimsizlik ve işlenebilirlik gibi özellikleri sağlaması gerekir (Önal ve Kahramangil, 1993).

Agregalar ile bitüm, istenilen düzeyde bir kaplama karışımı elde etmek amacıyla bünyesinde ilgili tüm bileşen malzemelerin oranlandığı, karıştırıldığı ve gerektiğinde ısıtıldığı bir karışım tesisinde bir araya getirilmektedirler. Bitümlü karışım geniş bir

yelpazeyi kapsamakta olup, genel anlamda asfalt kaplamalar ve makadamlar olarak ikiye ayırmak mümkündür.

Asfalt kaplamalar, 230°C'ye ulaşan sıcaklıklarda asfalt plentlerinde hazırlanan, mineral agregası, filler ve bitümden oluşan karışımlardır. Sıcak silindirlenmiş asfalt kaplama ve mastik asfalt en çok kullanılan asfalt kaplama tiplerine örnek olarak verilebilir. Mastik asfalt, bitüm ve ince agregası ile belli bir oranda iri agregası harcından oluşmaktadır. Mastik asfalt içerisindeki yüksek ince agregası yüzdesi, düşük sürtünme katsayısı ile birlikte pürüzsüz bir yüzey özelliği sağlar. Sıcak silindirlenmiş karışım esas olarak, otoyollar, ana arterler ve kent içi caddeleri gibi yoğun trafiğin olduğu yerlerde kullanılan yüksek kaliteli bir malzemedir. Sıcak silindirlenmiş karışımın en önemli özelliği kesintili gradasyona sahip olması, yani çok az miktarda orta boyutlu (2.36 mm - 10 mm arası) agregası içermesi, bunun yanında da ince agregası, dolgu maddesi (filler) ve iri agregadan oluşmasıdır.

Asfalt betonu karışımları, sürekli gradasyona sahip, daha yüksek oranda ve daha sert bir bitüm ile daha az iri agregası ve daha fazla ince agregası ile filler içermektedir. Asfalt betonu, mukavemet ve stabilitesini öncelikle agregaların kenetlenmesinden, bir miktarını da ince agregası-filler-bitüm harcından sağlamaktadır.

Poröz asfalt karışımları, yüksek boşluk oranı içerirler. Bu sayede özellikle hızların yüksek olduğu ıslak yollarda taşıtlar tarafından su sıçraması azaltılabilmektedir. Ayrıca yağmur suyunu yüzeyde biriktirmek yerine malzeme boyunca süzülmesini mümkün kılarak bir drenaj sistemi gibi davranmaktadır. Ancak, kullanılan bitüm oranının düşük olması durumunda agreganın iyi kaplanması mümkün olmayacak ve ince bitüm tabakası olması oksitlenmeyi artıracaktır.

Bitümlü makadamlar, bu yüzyılda kullanımı yaygınlaşmaya başlamış olup, hem iri agregası hem de daha küçük boyutlu agregaları ve bitüm kullanılarak hazırlanır. Filler ise, bağlayıcı maddenin viskozitesini artırmak suretiyle bitümün akmasını engellemek ve bitüm ile birlikte küçük boşlukların doldurulmasına yardımcı olmak amacıyla kullanılmaktadır. Kaplanmış makadam türleri karışımda kullanılan bitüm miktarı ve karışımın gradasyonuna göre çeşitlilik arz etmektedir. Bunlardan bazıları açık ve orta gradasyonlu makadamlar, yoğun ve üniform gradasyonlu makadamlar, ince gradasyonlu makadamlardır (Çubuk, 2007).

BSK'larda kullanılan bitüm ve agregaların, esnek üstyapının dolayısıyla BSK'ların performansını doğrudan etkilemektedir. İnşa edilen yolun öngörülen kalite, ömür ve konfor

sürekliliğinin sağlanması bakımından bitüm ve agregaların özelliklerinin bilinmesi gerekmektedir.

2.1. Bitümlü Sıcak Karışımlarda Kullanılan Agregalar

Agrega; doğal, yapay veya her iki cins yoğun mineral malzemenin, çeşitli büyüklüklerdeki kırılmamış ve/veya kırılmış tanelerinin bir yığındır (TS 706, 1980). En geniş tanımıyla; kum, çakıl, kırma taş, cüruf ve diğer mineral bileşiklerin bağlayıcı bir ortamda (bitümlü bir karışım, portland çimentosu betonu, harç, makadam, mastik vb.) veya bu malzemelerin bağlayıcısız kullanılmak üzere (demir yollarında balast malzemesi gibi) bir araya getirilmiş şekline agrega denir. Bitümlü karışımları meydana getiren esas malzemelerden biri olan agrega, yol kaplamasının stabilitesini sağlama görevinden başka miktar olarak da karışım içinde önemli bir yer tutmaktadır. Çünkü bitümlü sıcak karışımların ağırlıkça %90-95'i ve hacimce %80-85'i, agregadan oluşmaktadır (Tunç, 2001; Keçeciler ve diğ., 1988).

Bitümlü karışımlarda kullanılan agregalar; granülometrisi, maksimum dane boyutu, dane yüzey dokusu ve porozitesi ile kazanacağı adezyonla karışımın stabilitesini sağlamaktadır. Ayrıca bitümlü karışımlarda kullanılan agregalar, bitümlü tabakaların daha çok gerilme alması ve trafiğin aşındırıcı etkisine daha çok maruz kalması gibi nedenlerden ötürü temel tabakasında kullanılan agregalara göre daha üstün niteliklere sahip olmalıdır. Kullanılacak agreganın kökeni ne olursa olsun kaplama tipi için şartnamelerde verilen fiziksel özellikleri sağlaması gerekir (Tunç, 2001; Keçeciler ve diğ., 1988). Tablo 2.1'de çeşitli agrega cinslerinin mineral ve kimyasal bileşimleri verilmiştir.

Tablo 2.1. Mineral agrega cinslerinin özellikleri (Beysher, 1989).

Agrega Cinsi	Mineral bileşimler (%)	Kimyasal bileşimler (%)
Granit	Kuarsit 94	SiO ₂ 97
	Mikrokuarsit 3	K ₂ O + N ₂ O 2,8
	Serisit 2	Metamorfik asidik taş
	Biyotit 1	
Şist	Demir klorit (FeCl ₃) 60	SiO ₂ 48
	Plajiolklas 24,9	K ₂ O + N ₂ O 3,4
	Şist 7,1	Metamorfik bazik taş
	Kalsit 8	
Kalker	Kalsit 89	SiO ₂ 2
	Dolomit 11	Tortul karbonatlı taş

Mineral agrega malzemesi, kaba agrega, ince agrega ve mineral filler içeren en az üç ayrı dane gurubunun belirli oranlarda karıştırılması ile elde edilmektedir (Yollar Fenni Şartnamesi, 1994).

Agreganın şekli ve dokusu içsel sürtünme için gerekli kenetlenmeyi sağlar ve kübik-pürüzlü dokuya sahip olan agregalar, yuvarlak-pürüzsüz dokulu agregalardan daha fazla kayma direnci gösterirler (The Asphalt Institute, 1996). Dane biçimi de, mineral fillerin etkinliğinde önemli rol oynar. Köşeli daneler, yassı, düz ve uzun danelere tercih edilir. Arzu edilmeyen biçimdeki danelerin yüzdesinin artması fillerin niteliğini düşürür. Filler kimyasal bakımdan atıl olmalı yani bitümlü malzeme ile reaksiyona girmemelidir. Ayrıca, bitümlü karışımın yapıldığı sıcaklıkta bir değişikliğe uğramamalı, bağlayıcıya karşı iyi bir yüzey adezyonu göstermelidir. Kalker tozu, portland çimentosu ve silisli malzeme tozu çok sık kullanılan mineral filler malzemeleridir (Yollar Fenni Şartnamesi, 1994; Ishai ve Kallas, 1973).

Esnek ve rijit kaplamalarda kullanılan agregalarda aranan özellikler birbirine benzer ancak kaplamanın tipine, kullanım amacına ve trafik hacmine göre agregalardan beklenen özelliklerde değişiklik gösterebilir. Örneğin, rijit kaplamalarda kullanılan alt temel in amacı pompaj etkisini ve don kabarmalarını önlemek, drenaj vb. amaçları sağlaması iken esnek kaplamaların temel ve alttemel tabakalarının amacı buna ilaveten trafik yükünü zemine emniyetle yayabilmesi için yük taşımadan da sorumlu olmasıdır. Dolayısı ile bu tabakalarda kullanılacak agregaların gradasyon, yoğunluk, dayanıklılık, dane şekli, yüzey yapısı, plastisite ve permabilite gibi özellikleri gerekli şartları sağlamalıdır (Tunç, 2001).

2.1.1. Agregaların Sınıflandırılması

Agregalar çeşitli özellikleri bakımlardan sınıflandırılabilir. Bu sınıflandırma ile agregaların özelliklerinin tanınması ve bitümlü sıcak karışımlarda kullanılabilirliği belirlenmiş olur.

2.1.1.1. Agregaların Mineralojik Sınıflandırması

Agregalar kökenlerine göre, “Doğal Agregalar” ve “Sunı (yapay) Agregalar” olmak üzere ikiye ayrılır. Doğal agregalar kum ve çakıl gibi granüler malzemelerdir, genel olarak; dere malzemesi ve ya kırmataş olarak elde edilir. Kum-çakıl karışımından meydana gelen

dere malzemesi, olumsuz özelliklerinden dolayı alttemel tabakası hariç kaplamalarda kullanılmazlar. Ancak konkasörlerde kırılarak elde edilen kırma çakıl ve kırma kum olarak kaplama yapımında kullanılabilir. Yol inşaatında kullanılan taş ve agrega malzemesi, doğal kayalardan faydalanılarak da sağlanabilir. Doğal kayalar büyük bloklar halinde veya bunlardan elde edilen malzeme (çakıl) şeklinde kullanılırlar. Yol kaplamalarında kullanılacak en ideal agrega, Püskürük, Tortul ve Metaformik olarak sınıflandırılan doğal bir malzeme olan kayaların kırılması ile elde edilen kırmataş mineral agregalarıdır (Tunç, 2001).

Endüstriyel işlemler sonucu elde edilen yapay agregalar cüruf, klinker, çimento olmak üzere üç grupta incelenebilirler. Klinker; fırınların bir atığı olup küllerin eriyerek topak haline gelmesinden oluşur. Klinker çok değişebilen bir malzemedir. Bu nedenle yalnız bu iş için hazırlanmış şartnamelere uygun klinkerler asfalt kaplama yapımında kullanılabilirler. Çimento, bitümlü karışımlara bağlayıcı özelliğinden yararlanmak için ilave edilmez. Sadece, standart granülometrik bileşimi, saflığı ve bitümlü bağlayıcılarla herhangi bir reaksiyona girmediği için filler olarak işlev görür. Cüruflar, çeşitli metalurji tesislerinden elde edilen atık madde gruplarından birisidir. Kimyasal kompozisyonları ve özellikleri elde edildikleri sanayi kuruluşlarının ana ürün tipine ve üretim yöntemine bağlı olarak birbirinden çok farklılık gösterir. Örneğin yüksek fırın cüruflarının kendi başına bağlayıcı özelliği olmasına karşın nikel ve bakır cüruflarının yalnızca puzzolanik özellikleri vardır (Macit, 2003; Keçeciler ve diğ., 1988).

2.1.1.2. Boyut Sınıflandırması

Farklı boyutlardaki agrega grupları, kaplama karışımlarına farklı nitelikler sağlarlar. Bu nedenle, boyutlarına göre kaba (iri) agrega, ince agrega ve mineral filler olmak üzere üç farklı gruba ayrılan agreganın, ayrı ayrı incelenmesi gerekir.

Kaba agrega:

Kaba agrega, agrega karışımının 4.75 mm'lik (No:4) elek üzerinde kalan kısmı olup kırılmış, elenmiş, taş, çakıl veya elenmiş çakıl ile bunların karışımından ibarettir. Kaba agrega temiz, pürüzlü, sağlam ve dayanıklı danelerden oluşmalı ve içinde yumuşak ve dayanıksız parçalar, kil, organik ve diğer maddeler bulunmamalı ve diğer zararlı maddeler serbest ve ya agrega danelerini sarmış halde olmamalıdır. Bitümlü karışımındaki kaba

agrega, karışım içerisinde bir iskelet oluşturur ve karışımın akmaya karşı direncinde önemli bir rol oynar. Bu işlem dane şekli ve dokusu ile de yakından ilgilidir.

Karışıma giren kaba agrega çakıldan hazırlanmış ise 4.75 mm.lik (No:4) elek üzerinde kalan kısmının hafif ve orta trafikli yollar için ağırlıkça en az %60'ının, ağır trafikli yollar, otoyollar ve tırmanma şeritleri için % 100'ünün mekanik olarak kırılmış iki veya daha fazla yüzü bulunmalıdır (Yollar Fenni Şartnamesi, 1994).

Agrega daneleri kübik ve keskin köşeli, sert, sağlam ve temiz olmalı, kaba agrega içerisinde kil ve organik maddeler % 1'den fazla bulunmamalıdır (Yıldırım, 1984).

Bitümlü karışımdaki iri agrega yüzdesi % 40-50'ye çıkarılırsa, iri agrega mekanik bir iskelet oluşturur ve karışımın akmaya karşı direncinde önemli bir artış görülmeye başlar. Bu tip bir iskeletin sağlanması için gerekli iri agrega oranı, kullanılacak agreganın dane şekli ve dokusu ile ilgilidir. Beton asfalt kaplamalarda, % 55 oranında iri agrega içeren karışımların, % 25 oranında iri agrega içeren karışımlardan daha az deformasyona uğradığı görülmüştür (Umar ve Ağar, 1991).

Tablo 2.2'de kaba agreganın çeşitli trafik durumlarına göre aşınma ve binder tabakası için özellikleri verilmiştir.

Tablo 2.2. Kaba agreganın özellikleri (Yollar Fenni Şartnamesi, 1994).

Özellikler	Deney Metodu	Hafif ve Orta Trafikli Yollar		Ağır Trafikli Yollar, Otoyollar ve Tırmanma Şeritleri	
		Binder	Aşınma	Binder	Aşınma
Aşınma Kaybı (Los Angeles) max, %	TS 3694 (ASTM C-131)	35	35	35	30
Hava Tesirlerine Karşı Dayanıklılık (DonmaDeneyi, Na ₂ SO ₄ ile) kayıp, max. %	TS 3655 (ASTM C-88)	12	10	12	10
Kırılmışlık (en az iki yüzü) ağırlıkça, min, %	-	60	60	100	100
Yassılık İndeksi max, %	BS 812	35	35	35	30
Cilalanma Değeri min	BS 812	-	0.50	-	0.50
Su Absorpsiyonu max, %	TS 3526 (ASTM C-127)	2.5	2.5	2.5	2.0
Soyulma Mukavemeti min, %	-	50	50	50	50

İnce Agrega:

İnce agrega, agrega karışımının 4.75 mm'lik (No:4) elekten geçip 0.075 mm'lik (No:200) elek üzerinde kalan kısmı olup kırılmış taş, çakıl, kum ve ya bunların karışımından ibarettir. İnce agrega, kaba agreganın oluşturduğu iskeletin boşluklarını doldurarak daha yoğun bir karışımın oluşmasını sağlar. İnce agreganın yüzey dokusu, deformasyon direncine etkisi bakımından önemlidir. Örneğin, pürüzsüz bir çakıl kumu, kırma malzeme veya cürufa nazaran daha düşük bir deformasyon direnci sağlar. Cilalı yüzeyli agregaların asfaltla kaplanması kolay olmasına rağmen adezyonu zayıf olduğundan kolaylıkla soyulabilmektedirler.

Temiz, sağlam ve dayanıklı olmalı, plastisite indeksi % 2'den fazla bulunmamalıdır. Karışımında kullanılacak doğal kum ince agrega özelliklerine sahip olmalı ve bunun miktarı karışımından istenilen stabilite, akma ve boşluk değerlerini sağlamalıdır (Umar ve Açar, 1991; Tunç, 2001; Yollar Fenni Şartnamesi, 1994).

Aşınma tabakası içerisinde doğal kum % 30'dan, binder tabakasında ise % 50'den fazla bulunmamalıdır (Yıldırım, 1984). Tablo 2.3'de ince agreganın özellikleri verilmiştir.

Tablo 2.3. İnce agreganın özellikleri (Yollar Fenni Şartnamesi, 1994).

Özellikler	Deney Metodu	Binder Tabakası	Aşınma Tabakası
Plastisite İndeksi (max, %)	TS 1900	2	2
Organik Madde Miktarı (max, %)	TS 3673 (AASHTO T – 194)	0.1 (Renk Skalası 0.5)	Müsade edilmeyecek

Mineral Filler:

Mineral filler genel anlamı ile tamamı 0.600 mm'lik (No:30) elekten geçen, ağırlıkça en az %70'i 0.075 mm'lik (No:200) elekten geçen malzeme olarak tanımlanır. Mineral filler, toplam agreganın çok küçük bir yüzdesini oluşturmalarına rağmen, karışımın özelliklerinin düzeltilmesinde etkileri çok önemlidir. 0.075 mm'lik elekten geçen her malzeme mineral filler olarak kullanılmaz. Mineral fillerin 0.075 mm'lik elekten geçen kısmı düzgün bir granülometrik bileşime sahip olmalı ve aynı zamanda 0.001 mm'den ince boyutlu daneler de olmalıdır. Kaba ve ince agreganın karışım gradasyonu 0.600 mm. (No. 30) elekten geçen malzeme miktarı yönünden yetersiz ise, agrega karışımına mineral filler ilave edilebilir. Mineral filler taş tozu, mermer tozu, portland çimentosu, sönmüş kireç veya benzeri maddelerden oluşmalı, içerisinde kil, toprak, organik ve zararlı madde ihtiva etmemelidir. Plastisite indeksi 4'den fazla olmamalı, kolayca akabilecek kadar kuru olmalı ve özellikle topaklar ihtiva etmemelidir (Yollar Fenni Şartnamesi, 1994).

Mineral fillerin dane şekli yönünden köşeli daneler, yassı, düz ve uzun danelere göre daha uygundur. Yassı, düz ve uzun danelerin yüzdesinin artması fillerin özelliğini düşürür. Filler bitümle reaksiyona girmemelidir yani kimyasal bakımdan atıl olmalıdır. Ayrıca, bitümlü karışımın yapıldığı sıcaklıkta bir değişikliğe uğramamalı, bağlayıcıya karşı iyi bir yüzey adezyonu göstermelidir (Umar ve Ağar, 1991). Tablo 2.4'de mineral fillerin gradasyon limitleri verilmiştir.

Tablo 2.4. Mineral fillerin gradasyon limitleri (Yollar fenni şartnamesi, 1994).

Elek Boyu	Ağırlıkça % geçen
0.600 mm (No:30)	100
0.300 mm (No:50)	95-100
0.075 mm (No:200)	70-100

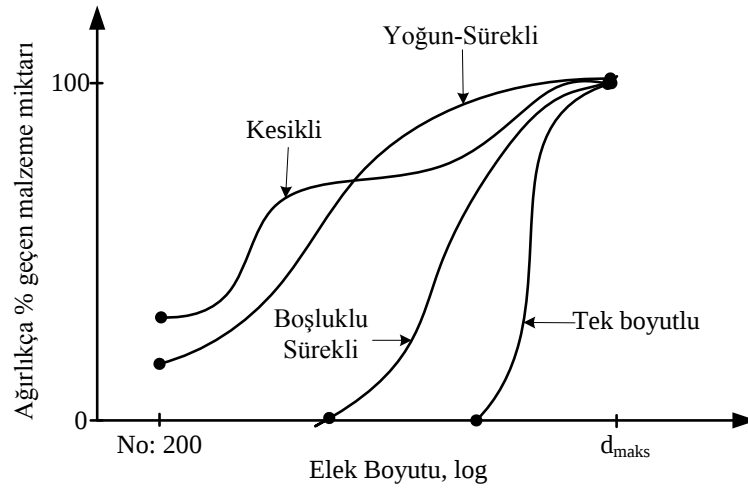
2.1.1.3. Gradasyon Sınıflandırması

Bitümlü sıcak karışımlarda agrega gradasyonu karışımın stabilite ve işlenebilirlik özelliğini belirler. Agrega karışımındaki maksimum boyut 1 inç'ten (25.4 mm) fazla olması yani maksimum dane boyutunun artması durumunda işlenebilirlik ve sıkışma zorlaşır, yoğunluk, stabilite ve segregasyon artar, boşluk miktarı azalır, agrega danelerinin toplam yüzeyi azalır ve bağlayıcı ihtiyacı azalır. Gradasyon, agrega harmanındaki bütün danelerin boyutlarına göre dağılımını ifade eder. Belirli bir karışım için maksimum dane boyutu ve belirli boyuttaki danelerin ağırlıkça miktarlarının belirli limitler dahilinde olması şartnameler ile belirlenmiştir.

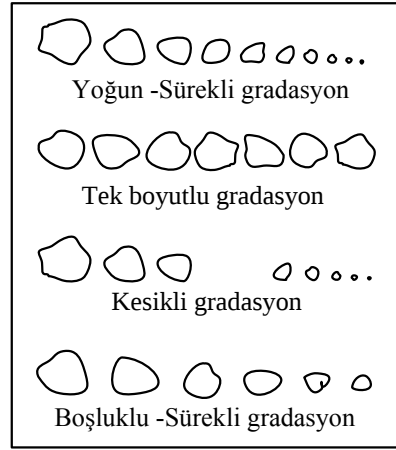
Agregalar gradasyon yönünden aşağıdaki gibi sınıflandırılır.

- Kesikli gradasyon
- Yoğun-sürekli gradasyon
- Boşluklu-sürekli gradasyon
- Tek boyutlu gradasyon

Bu gradasyon tipleri Şekil 2.1'de ve Şekil 2.2'de görüldüğü gibi, elek analiz grafiğinde kolayca ayırt edilebilir ve farklı özelliklere sahiptir (Tunç, 2001).



Şekil 2.1. Agrega gradasyon tipleri



Şekil 2.2. Agrega gradasyon tiplerinin görsel dağılımı

Kesikli gradasyona sahip agregalarda, bazı çaplarda daneler bulunmadığından boşluk miktarları fazladır. Bu nedenle genel olarak yol inşaatında kullanılmamaktadır. Boşluklu-Sürekli gradasyon, ince malzeme ihtiva etmediğinden dolayı boşluk oranı yüksektir ve sıcak karışımlarda kullanılmaz. Düşük standartlı yolların temel tabakasında ve dona duyarsız tabakalarda kullanılabilir. Tek boyutlu gradasyonda da hemen hemen aynı boyuttaki agregalar bulunduğundan sathi kaplama ve koruyucu örtü tabakası gibi düşük standartlı yol kaplamalarında kullanılmaktadır. Yoğun-sürekli (iyi derecelenmiş) gradasyonda, en iri malzemeden en ince malzemeye kadar olan agrega boyutları danelerin aralarındaki boşlukları dolduracak şekilde uygun oranlarda olduğundan karışımın boşluk oranı düşük olmakta, dolayısıyla yoğunluğu artmaktadır. Bu sebeple, bitümlü sıcak

karışımlarda kullanılacak agregaların, yoğun-sürekli gradasyona sahip olması istenmektedir (Tunç, 2001).

2.1.1.4. Biçim Sınıflandırması

Agrega danelerinin biçimi, yol kaplamalarında kullanılan karışımların;

- Sıkışma direnci
- İşlenebilirlik
- Yoğunluk
- Stabilite
- İçsel kilitlenme (kenetlenme) ve içsel sürtünme açısı
- Kayma mukavemeti ve CBR özelliklerine etki eder.

Yuvarlak biçimli agregaların köşeli (açısal biçimli) agregalara göre işlenebilirlik özelliği daha yüksek olmasına rağmen stabilite (deformasyona gösterilen direnç) yönünden köşeli agregalar yuvarlak biçimli agregalara nazaran daha üstündür. Köşeli agregaların temas noktaları sayısı daha çok olduğundan içsel sürtünme açıları ve daneler arasındaki kilitlenme (kenetlenme) ve stabilitesi daha fazladır. Aynı ocaktan alınan yuvarlak daneli agregalar ile bu agregaları kırarak elde edilen köşeli agregalar aynı boşluk oranında sıkıştırılırsa daha yüksek CBR ve stabilite değerleri elde edilmektedir (Tunç, 2001).

2.1.1.5. Yüzey Yapısı Sınıflandırması

Agregaların yüzey yapısı; agregaların yüzey pürüzlülüğünü ve cilalılık durumunu ifade eden bir desendir ve bağlayıcı ile iyi bağ kurabilmeleri için çok önemlidir. Pürüzlü yüzey dokusuna sahip agregalar, bağlayıcı ile iyi bir kenetlenme meydana getirerek güçlü bir bağ ile iyi bir karışım oluşturabilirler. Eğer agregaların yüzey pürüzlülüğü fazla ise karışımın işlenebilirliği azalmakta ancak içsel sürtünme açısı, stabilite, kayma direnci ve asfalt ile adezyon kuvveti artmaktadır. Ancak buna karşın karışımın boşluk hacmi ve sıkışmaya karşı direnci gibi olumsuz özellikleri de artmaktadır. Bu nedenle, agregaların yüzey yapısı agregadan beklenen özelliklere önemli ölçüde yansımaktadır (Tunç, 2001; Balta, 2004).

2.1.1.6. Porozite Sınıflandırması

Agrega danelerinin porozitesi yani su emme yeteneğine sahip boşlukların miktarı belli bir düzeyde olmalıdır. Yeterli poroziteye sahip agrega daneleri bitümün emilmesine olanak sağlamasından dolayı agrega ile bağlayıcı film tabakası arasında kuvvetli bir adezyon oluşturarak stabilitenin artmasına ve suyun etkisi ile film tabakasının soyulmasının azalmasına neden olmaktadır. Agregadaki gözeneklerin boyutu, sayısı ve süreklilikleri, agregaların dayanımını, aşınmaya karşı direncini, yüzey dokusunu, özgül ağırlığını, stabilitesini, bağlayıcı ile adezyonunu ve donma-çözölmeye karşı direncini etkilemektedir. Ayrıca fazla asfalt kullanımı gerektirdiğinden sıcak havalarda kusma-terleme problemleri oluşturmaktadır (Tunç, 2001; Balta, 2004).

2.1.1.7. Yüzey Alanı ve Boşluk Sınıflandırması

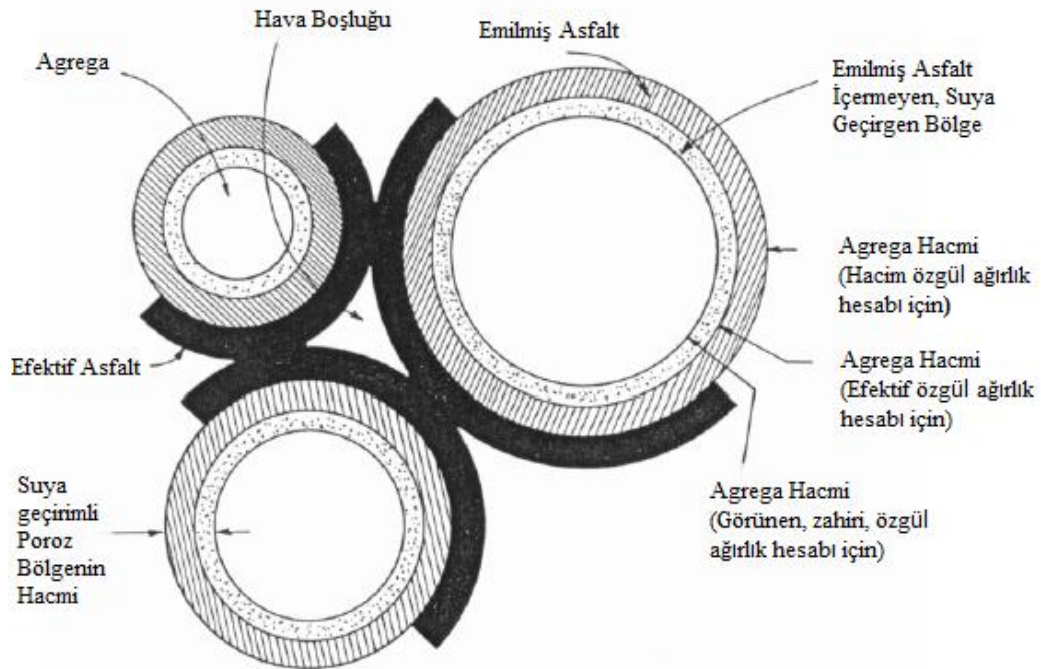
Agrega danelerinin sahip oldukları yüzey alanlarının toplamı ile agrega daneleri arasındaki boşlukların toplamı, bağlayıcısız veya stabilite edilmiş (bağlayıcı) karışımların tüm özelliklerine doğrudan etki eden önemli faktörlerdir. Toplam yüzey alanı ile toplam boşluk hacmi gradasyon, maksimum dane çapı, dane biçimi vb. gibi özelliklere bağlıdır. Agregaların dane çapı küçüldükçe yüzey alanı ve boşluk hacmi önemli ölçüde artar. Bu nedenle gerekli bağlayıcı ihtiyacı artacak, ayrıca boşluk miktarının artması ile karışımın yoğunluğu azalacaktır. Ancak, maksimum dane çapının artması ile işlenebilirlik problemi artsa da karışımın yoğunluğunda artış olacak, fakat buna karşın gerekli bağlayıcı miktarı azalarak karışımın kohezyonu, stabilitesi ve durabilitesi azalacaktır. Bu sebeple kaplamalarda kullanılacak agregaların maksimum dane, çapı karışımın bu özelliklerini optimize edecek şekilde seçilmelidir. Bundan dolayı üst tabakalarda daha ince ama alt tabakalarda daha kaba gradasyonlu agregalar kullanarak karışımdan beklenen özellikler sağlanabilir (Tunç, 2001).

2.1.1.8. Özgül Ağırlık Sınıflandırması

Bir maddenin birim hacimdeki ağırlığının, aynı hacimde ve 25°C'deki suyun ağırlığına oranı özgül ağırlık olarak tarif edilir. Agreganın özgül ağırlığı, bitümlü sıcak karışımda kullanılacak bağlayıcı oranını belirlemede yardımcı olmaktadır. Asfalt karışım

hesaplarında kullanılan agregâ için seçilecek olan özgül ağırlık, sıkıştırılmış kaplamada hesaplanan hava boşlukları miktarını en doğru olarak veren özgül ağırlık olmalıdır. Şekil 2.3’de özgül ağırlık hesaplamalarında dikkate alınan agregâ hacim tanımlamaları görülmektedir. Karışım hesapları için agregaların özgül ağırlıklarının bilinmesi gerekir. Agregâ üç tip hacim içerdiğinden dolayı;

- Zahiri (görünür) özgül ağırlık
- Hacim özgül ağırlığı veya kuru özgül ağırlık
- Doygun-kuru yüzey özgül ağırlık olmak üzere üç farklı özgül ağırlığa sahiptir (Tunç, 2001).



Şekil 2.3. Agreganın özgül ağırlık hesaplamalarında dikkate alınan hacimleri (Balta, 2004).

Hesaplamalarda zahiri özgül ağırlık kullanıldığında, asfaltın su geçirimli tüm boşluklar tarafından absorbe edildiği kabul edilir. Hacim özgül ağırlık kullanıldığında, asfaltın su geçirimli boşluklar tarafından absorbe edilmediği kabul edilir. Efektif özgül ağırlık, agregâ tarafından absorbe edilen asfalt miktarını dikkate aldığından, sıkıştırılmış asfalt kaplama karışımındaki boşluk hesabı için en doğru sonucu vermektedir (Önal ve Kahramangil, 1993).

2.1.2. Agregaların Kaynak Özellikleri

Agreganın diğer özellikleri yanında kaynak özellikleri de kaplamanın stabilitesi için önemlidir. Agreganın kırılmışlık yüzdesi, köşeliliği gibi özellikleri üretim ile ilgili iken kaynak özellikleri agreganın yapısı (veya doğal oluşumu) ile ilgilidir. Büyük bloklardan kırma yolu ile elde edilen agregaların köşelilik, kırılmışlık yüzdesi gibi özellikleri değiştirmek yani mükemmelleştirmek mümkün iken kaynak özellikleri jeolojik oluşum sonucu meydana geldiğinden üretiminden önce agreganın kaynağında yani taş ocağında dikkatlice seçilmelidir. Agreganın kaynak özellikleri:

- Aşınma direnci (Dayanıklılık),
- Don dayanıklılığı (Sağlamlık),
- Yabancı (Zararlı) madde miktarı (kil topakları ve ufalanabilir daneler), olarak ele alınmaktadır (Tunç, 2001).

2.1.2.1. Aşınma Özelliği (Dayanıklılık)

Agreganın bu özelliği Los Angeles aşınma deneyi sonucunda agrega yığnında meydana gelen aşınma yüzdesi ve ya kayıp malzemenin yüzde olarak ifadesidir. Bu test kaba agreganın kaba agreganın karıştırma, yapım ve servis sürecinde aşınma ve mekanik parçalanmaya karşı direncini belirler. Aşınma yüzdesi şartnamede belirtilen miktardan fazla olmamalıdır. Agregalarda aşınma kaybının genel olarak en fazla % 30 olması istenmektedir (Tunç,2001; The Asphalt Institute, 1996).

Agregaların aşınma özelliği AASHTO T 96, ASTM C 131 veya C 535'e göre belirlenir.

2.1.2.2. Don Dayanıklılığı (Sağlamlık)

Bitümlü sıcak karışımın sağlamlığı ve hava koşullarına dayanması, agreganın dona ve rutubet değişikliklerine dayanmasını gerektirir. Ayrıca agrega ısı değişikliği dolayısıyla önemli derecede hacim değişimine uğramamalı ve agrega değişik hava koşullarında kimyasal hiç bir reaksiyon göstermemelidir.

Agreganın don dayanıklılığı ya da sağlamlık özelliği; doygun sodyum sülfat (Na_2SO_4) veya magnezyum sülfat (MgSO_4) çözeltisine konulan agreganın kütleinde oluşan kayıp malzemenin yüzdesi olarak belirlenir ve agregaların servis süresince hava etkileriyle donarak ufalanmaya karşı olan direncini ifade eder. Agregalarda donma kaybı yüzdesinin en fazla %10–20 civarında olması istenmektedir (The Asphalt Institute, 1996; Asfalt ve Uygulamaları, 2001; Keçeciler ve diğ., 1988). Agregaların bu özelliği AASHTO T 104 veya ASTM C 88 standardı ile belirlenir.

2.1.2.3. Yabancı Maddeler

Agregalar, bazen bitümlü karışımlarda kullanılmaması gereken bazı maddeler ihtiva ederler. Bu maddeler yanında, kaba agrega danelerini saran fazla miktarda kil agreganın bünyesindeki kil topakları, yassı ve uzun daneleler, mika, kömür, linyit ve diğ. yabancı maddeler de zararlı maddeler olarak sayılabilir.

Agrega içerisindeki yabancı ve zararlı maddelerin; kil topakları, ufalanabilir parçalar, odun, mika, kömür, vb. ağırlıkça yüzdesi olarak tarif edilir. Agreganın bu özelliği ASTM T 112 veya C 142 standardı ile belirlenir (Tunç, 2001). Yabancı maddenin kirletici özelliğine bağlı olarak agrega içindeki bulunabilirlik oranı en fazla % 0.2 ile % 10 arasında olmalıdır (Tunç, 2001; The Asphalt Institute, 1996; Harman, 2002).

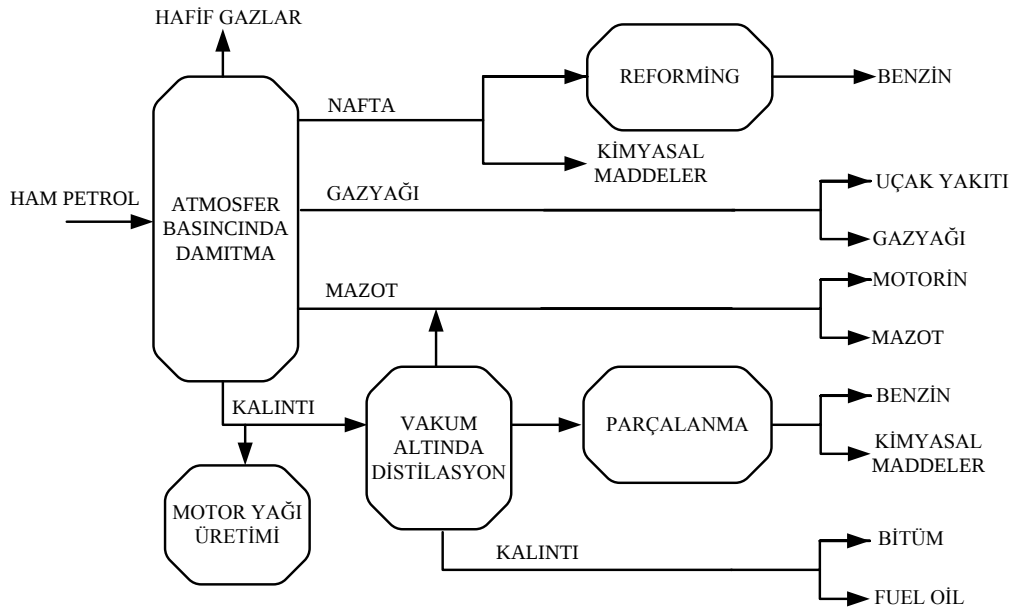
2.2. Bitümlü Sıcak Karışımlarda Kullanılan Bağlayıcılar

Organik maddelerin milyonlarca yıl önce bakterilerin ve doğal katalizörlerin etkisi ile parçalanmaları sonucu oluştuğu kabul edilen petrol çok sayıda hidrokarbonun bir karışımıdır. Petrolün atmosferik veya vakum damıtması sonucu elde edilen dip ürünü ise bitümdür. Dolayısıyla bitüm, doğal kökenli hidrokarbonların bir karışımı ya da pirojenik kökenli hidrokarbonların bir karışımı veya bunların her ikisinin bileşimi olup, bunların sıcaklığa bağlı olarak sıvı, yarı katı ya da katı halde olabilen, metal dışı türevleriyle bir arada bulunan, yapıştırıcı özellikleri olan ve karbon sülfürde tamamen çözünen madde olarak tanımlanır.

Bitüm, asfalt ve katran olmak üzere iki ana gruptan oluşmaktadır. Organik temelli olan asfalt ve katranlar, yüksek moleküllü hidrokarbonlar olarak tanımlanabilir. Asfaltın n-heptanda çözülmeyen kısmına asfalten, çözülen kısmına malten adı verilir. Asfaltenler

bitümün % 5-25'ini oluştururlar. Maltenler ise bitümün % 40-65'ini oluşturan aromatikler başta olmak üzere reçineler ve doymuş hidrokarbonlardan oluşmaktadır.

Doğal asfaltlar, mineral maddeler ile karışmış halde bulunan kaya ve göl asfaltlarıdır. Yapay asfaltlar ise ham petrolün damıtılmasından elde edilir. Katran ise başlıca kömürün veya odunun kapalı bir sistem içerisinde kuru kuruya damıtılmasından elde edilir. Bitüm, genel olarak doğal kaynaklıdır. En zengin bitüm kaynağı ise ham petroldür. Şekil 2.4'de ham petrolden bitüm üretiminin basit bir şematik gösterimi verilmektedir.



Şekil 2.4. Bitüm üretiminin şematik gösterimi (Whiteoak, 2004).

Atmosferik veya vakum damıtması sonucu elde edilen dip ürün büyük ölçüde bitüm içerir. Damıtma ile elde edilen bitüm yol yapımında kullanılanlardan farklıdır. Bitüm özelliklerini geliştirici bir işlemde geçirerek yol yapım malzemesi olarak kullanılması mümkündür.

Bitümü, yapısını oluşturan aromatikler, reçineler, doymuş hidrokarbonlar ve asfaltın oranlarının sistematik karışımı, bitümün reolojisinin yapısına bağlı olduğunu göstermiştir. Bu nedenle bitümün modifiye edilmesine karşı duyulan ilgi her geçen gün artmaktadır (İlcalı ve diğ., 2001).

Bitümlü malzemeler reolojik özellikleri ve termal dirençleri sebebiyle yol üst yapılarında tercih edilmekte olup, esnek kaplamaların gerek stabilite gerekse performans yönünden üstün nitelikli olmaları içinde pek çok çalışma yapılmaktadır. Bu çalışmalardan

en önemlisi ise bitümün modifiye edilerek esnek kaplamaların performanslarının artırılması çalışmalarıdır.

Genel olarak penetrasyon cinsi, oksitlendirilmiş (okside, hava üflenmiş) bitümler, sert bitümler ve katbek bitümlerin üretimi yapılmaktadır. Penetrasyon cinsi bitümler genellikle yol inşaatında, daha sert olan bitümler (35 ile 100 penetrasyon arasındakiler) rijitliğin önemli olduğu karışımlarda, daha yumuşak olan (100 ile 450 penetrasyon arasındakiler) bitümler ise uygulama sırasında yağlama özellikleri ve servis ömründe adezyonun önemli olduğu karışımlarda kullanılır. Oksitlendirilmiş bitümlerin tamamına yakın bir kısmı çatı kaplama, zemin döşeme (parke, marley vb.), mastikleme, boru kaplama işlerinde, boyalar, vb. uygulamalarda kullanılır. Sert bitümler boya imalatı, kömür briketleme, vb. endüstriyel uygulamalarda yaygın biçimde kullanılır. Katbek bitümler ise, şartnamelerde belirtilen bir viskozitenin sağlanması amacıyla 100 penetrasyon ya da 200 penetrasyon gibi yüksek penetrasyonlu bitümlerin gazyağı ile karıştırılması ile üretilir (Whiteoak, 2004).

Yol yapımı için kullanılacak bitümlerde aranan özellikler;

- Düktilite özelliğinin fazla olması,
- Yumuşama sıcaklığının yüksek olması,
- Maddeye şekil verilen sıcaklık aralığının geniş olması,
- Yapışabilme özelliğidir.

Bu fiziksel özelliklerin yanında aranan en önemli kimyasal özellikte bitümün hava ve toprağın oksijen ve nemine karşı yüksek bir oksitlenme direncine sahip olmasıdır. Bu özellikler bitüme 150-350°C arasında 2-24 saat süre ile hava üfleyerek kazandırılır (Kuleli, 1981).

Yol üst yapılarında en çok kullanılan esnek kaplamaların niteliğini belirleyen, kaplamayı meydana getiren bitümlü bağlayıcı ve agrega malzemelerin özelliğidir. Esnek kaplamalarda en çok karşılaşılan sorunlar ise adezyon eksikliği, tekerlek izi oluşumu, çatlamlar ve soyulmalar gibi deformasyonlardır. Bu nedenle esnek kaplamalarda çok sık karşılaşılan deformasyonların giderilmesinde modifiye bitüm kullanılmaktadır. Bitümlü bağlayıcıların ve karışımların modifikasyonunda kullanılan en önemli katkı maddesi grubu polimer katkılardır.

2.2.1. Bitümün Kimyasal Bileşimi, Yapısı ve Reolojisi

Bitümün belirli bir sıcaklıktaki reolojisi, hem içeriği yani malzemedeki hâkim hidrokarbon moleküllerinin kimyasal bileşimi hem de fiziksel yapısı ile belirlenmektedir. Bu unsurlardan biri veya her ikisi değişikliğe uğratılırsa reolojik yapıda da değişikliğe yol açacaktır. Bu nedenle, bitüm reolojisini anlayabilmek için, bir bitümün bileşim ve yapısının reolojiyi etkileyecek ne tür bir etkileşim içinde olduğunu bilmek gerekmektedir (Whiteoak, 2004).

2.2.1.1. Bitümün Kimyasal Bileşimi

Bitüm, hidrokarbon molekülleri ile yapısal olarak benzer heterosiklik türler ve kükürt, oksijen ve azot atomları içeren fonksiyonel grupların karmaşık bir kimyasal karışımıdır. Bitüm aynı zamanda çok az miktarda oksitler ve inorganik tuzlar ya da kalsiyum, nikel, demir, vanadyum ve magnezyum gibi metaller de içermektedir. Ham petrollerden elde edilen bitümlerin analiz sonuçları genel olarak aşağıdaki elementleri içermektedir (Whiteoak, 2004):

- Karbon % 82-88
- Hidrojen % 8-11
- Kükürt % 0-6
- Oksijen % 0-1.5
- Azot % 0-1

Bitümün kompozisyonu, elde edildiği ham petrolün kaynağına ve sonra imalat sırasında yapılan işlemler ile kullanma süresince meydana gelen oksitlenmeye göre değişiklik arz etmektedir. Bitümü fraksiyonlarına ayırmak suretiyle kimyasal yapısı belirlenebilir. Bu fraksiyonlarına ayırma işlemi için kullanılan yöntemler ise şu şekilde sıralanabilir (Ertekin, 2003).

1. Solvent ekstraksiyonu
2. Destilasyon
3. Kromatografi
4. Kolon kromatografisi ve absorbe edilmeyen çözeltinin filtreyle ayrılması.

Bitümün kimyasal kompozisyonu oldukça karmaşık olduğundan malzemenin tam bir kimyasal analizi oldukça yoğun incelemeler gerektirmekte ve sonuçta reolojik özelliklerle

korelasyonu imkansız hale getirecek miktarda çok veri ortaya çıkmaktadır. Fakat bitümü asfaltlenler ve maltenler olarak adlandırılan iki geniş kimyasal gruba ayırmak mümkündür. Maltenlerde ayrıca doymuş hidrokarbonlar, aromatikler ve reçineler olarak alt gruplara ayrılır (Whiteoak, 2004).

Asfaltlenler:

Asfaltlenler, karbon ve hidrojenden oluşan ve bir miktar azot, kükürt ve oksijen içeren, n-heptan içerisinde çözünmeyen oldukça yüksek molekül ağırlığına sahip, polar (elektriksel yüklere sahip) siyah veya kahverengi amorf katılardır. Asfaltlenler bitümün % 5-25'ini oluşturmakta ve miktarı bitümün reolojik özellikleri üzerinde önemli etkilere sahiptir. Asfaltlen miktarının artırılması ile daha düşük penetrasyon ve daha yüksek yumuşama noktasına sahip, daha sert ve sonuç olarak daha yüksek viskoziteli bir bitüm elde edilmektedir (Whiteoak, 2004).

Ancak asfaltlen içeriğinin sınırları aşması durumunda, yaşlanma sırasında reçinelerin yavaş yavaş asfaltlenlere dönüşmesine ve bitümün istenmeyen sonuçlarının ortaya çıkmasına neden olur (İlcalı ve diğ., 2001).

Reçineler:

Reçineler, n-heptan içerisinde çözünen, asfaltlenler gibi geniş oranda hidrojen ve karbondan oluşmuş ve az miktarda oksijen, kükürt ve azot içeren maddeler olup, koyu kahverengi renkte katı ya da yarı katılardır. Reçinelerin elektriksel olarak oldukça yüklü olmaları, reçinelerin güçlü bir yapışkan olmalarını sağlamaktadır. Reçineler asfaltlenleri ayıran ya da yayılmalarını sağlayan katılar olup, reçinelerin asfaltlenlere oranı, bir dereceye kadar bitümün jelâtin (GEL) tipi ya da çözelti (SOL) tipi olma özelliğini kontrol etmektedir (Tunç, 2004).

Aromatikler:

Bitüm içerisindeki en düşük molekül ağırlıklı naftanik hoş kokulu bileşenlerden oluşan ve bitüm içerisine dağılmış asfaltlenlerin yayılımları için gereken ortamın büyük kısmını teşkil eden aromatiklerdir. Aromatikler, toplam bitümün % 40-65'ini oluşturan koyu kahverengi, viskoz sıvılar olup, doymamış halka sistemlerin hâkim olduğu polar olmayan karbon zincirlerinden oluşmakta ve diğer yüksek moleküler ağırlıklı hidrokarbonlar için yüksek çözünme yeteneğine sahiptirler (Whiteoak, 2004).

Doygun hidrokarbonlar:

Doygun hidrokarbonlar, alkil-naftenler ve bazı alkil-aromatikler ile birlikte düz ve zincir şeklinde alifatik hidrokarbonlardır. Bunlar saman veya beyaz renkteki polar olmayan

viskoz yağlar olup, hem parafinik hem de naftanik yağ halkalarını içerir. Doygun hidrokarbonlar bitümün % 5-20'sini oluşturmaktadır (İlcalı ve diğ., 2001).

2.2.1.2. Bitümün Yapısı

Bitüm, asfaltın maltenler içerisinde çözünmüş veya dağılmış bir süspansiyon sistemi olarak tanımlanmaktadır. Asfaltın damlacıkları, asfaltın etrafını bir kılıf gibi çeviren yüksek molekül ağırlıklı aromatik reçinelerdir. Damlacıkların merkezinden uzaklaştıkça, daha düşük elektriksel yüklere sahip aromatik reçineler bulunmaktadır. Yeterli miktarda aromatikler ve reçineler bulunduğunda asfaltın tamamen dağılır ve oluşan damlaların bitüm içerisindeki hareketliliği oldukça iyi olur. Bunlar çözelti ya da SOL tipi bitümler olarak adlandırılır (Whiteoak, 2004).

Yeterli miktarda hoş kokulu ve reçine bileşenleri mevcut değilse ya da bu bileşenler yeterli çözücü güce sahip değilse asfaltın birbirleriyle daha da ilişkili olabilmektedir. Bunun sonucunda damlaların birbirleriyle bağlantılı olduğu ve içlerindeki boşluklarında diğer maddelerden (doymuş hidrokarbonlar vs.) oluşan sıvıyla dolmuş bir yapı meydana gelir. Bu bitümler ise jelatinli veya JEL tipi bitümler olarak adlandırılmaktadır. Bunlara en iyi örnek, çatı kaplamalarında kullanılan oksitlendirilmiş bitümler verilebilir. Uygulamada bitümlerin büyük kısmı orta karakterdedir (Whiteoak, 2004).

Asfaltın kolloidal davranışı, bitüm içindeki kümeleşme veya petekleşmeye bağlı olarak değişir. Bunların sistem içerisindeki yayılma dereceleri malzemenin viskozitesini belirgin derecede etkilemektedir (Tunç, 2004). Bu tür etkiler sıcaklıkla azalma göstermekte ve belirli bitümlerin jel karakterleri yüksek sıcaklıklara dek ısıtıldığında kaybolabilmektedir. Doygunların, aromatiklerin ve reçinelerin viskoziteleri moleküler ağırlık dağılımlarına bağlı olup, moleküler ağırlık arttıkça viskozite de artmaktadır.

Maltenlerin viskozitesi, bitüme dağılmış fraksiyonun yani asfaltın varlığı sayesinde artmış, doğal bir viskozite, yapışkanlık kazandırmıştır. Doygun kısımlar asfaltın belirli derecede kümelenmelerine yol açtığından, maltenlerin asfaltın çözme yeteneklerini azaltmaktadır. Bu nedenle, bitümlerin jel özelliğindeki artış ve sıcaklık bağımlılıklarının düşmesi sadece asfaltın içeriğinden değil aynı zamanda doymuş içeriğinden de kaynaklanmaktadır (Whiteoak, 2004).

2.2.1.3 Bitümün Reolojisi

Reoloji, bir maddenin akma ve deformasyonunu sadece maddeye uygulanan yüke değil ayrıca bu yükün uygulanma süresini dikkate alarak belirlemeye çalışan bir bilimdir. Bitüm reolojisi ise belirli bir sıcaklıkta hem kimyasal bileşenlerinin hem de malzemedeki baskın hidrokarbon yapıların saptanması; bileşimindeki, yapısındaki veya her ikisinde birden olan değişikliklerin etkisinin incelenmesidir. Bitüm reolojisindeki değişimler, o bitümün yapı ve bileşenlerinin etkisi ile oluşmaktadır. Bitüm, reolojik bir malzeme olduğu için yük altında davranışı, üzerine uygulanan yüke ve bu yükün uygulanma süresine bağlıdır. Ayrıca, bitüm termoplastik bir malzemedir ve bu yüzden sıcaklık değişimlerine karşı da duyarlıdır. Bu nedenle, bitümün davranışı, üzerine uygulanan yüke, yükün uygulanma süresine ve bitümün bu esnadaki sıcaklığına bağlıdır. Bitümün tüm bu özellikleri, katıldığı sıcak karışıma geçer ve bundan dolayı bitümlü karışımlar da, viskoelastik ve termoplastik malzemelerdir. Yaz aylarındaki sıcak havalarda ya da yavaş hareket eden ağır taşıtların altında bitümlü kaplamalar, yukarıda belirtilen sebeplerden dolayı viskoz sıvılar gibi hareket ederek akarlar. Eğer akmaya karşı direnir çok düşük ise, kaplamada ağır yük ve/veya yüksek ısıdan dolayı tekerlek izi oluşabilmektedir. Düşük sıcaklıklarda ise termoplastik özelliklerinden dolayı bitümlü kaplamalar, çok sert veya kırılabilir hale gelebilmekte ve kaplamada çatlaklar oluşabilmektedir (Sybilski, 1994).

Viskozitenin belirlenmesi, reoloji biliminin temel konusudur. Viskozite, iki molekül tabakası arasında, birinin diğerinin üzerinde hareketi esnasında bu harekete engellemeye çalışan direnir olarak da düşünülebilir. Bitümün kimyasal yapısı, bitümlü karışımların reolojisini etkilediği için, bitümlü karışımların esas elemanlarından biri olan bitümün, viskozite-sıcaklık ilişkilerinin belirlenmesi gerekir.

2.2.2. Bitümün Özellikleri

Penetrasyon cinsi bitümlerin laboratuvarında belirlenen özellikleri ile yol üst yapılarında kullanılan karışımlarındaki performans ilişkisi uzun yıllardır araştırılmaktadır. Bitüm, karışımda hacimce küçük bir yer tutmasına rağmen dayanıklılık ve bitümlü karışıma viskoelastik özellik kazandırması sebebiyle karışımlarda çok önemli bir role sahiptir. Bitümün yol üzerinde tatmin edici bir performans göstermesi, aşağıda sıralanan dört özelliğin kontrol edilmesi ile sağlanabilir (Çubuk, 2007).

1. Reoloji
2. Kohezyon (faz içerisinde yapışkanlık)
3. Adezyon (fazlar arasında yapışkanlık)
4. Dayanıklılık

Mühendislikte kullanılan malzemeler yüke ve zamana bağlı olarak gerilme-deformasyon yönünden üç gruba ayrılmaktadırlar. Bunlar; elastik malzemeler, viskoz malzemeler ve visko-elastik malzemelerdir. Elastik malzemeler gerilmeye tabi tutulduklarında yükün miktarı ile doğru orantılı olarak deformasyon miktarı artar ve tatbik edilen gerilme ortadan kalktığında deformasyon da ortadan kalkar. Viskoz malzemeler de, gerilme tatbik edildiğinde deformasyon başlar ve gerilme tatbik edildiği sürece deformasyon yükün tatbik süresine bağlı olarak artar. Ancak, gerilme kalktığında deformasyon kalkmaz yani kalıcı deformasyon oluşmaktadır. Viskoelastik malzemeler ise ne tam elastik ne de tam viskoz davranış gösterirler. Ayrıca hızlı yüklendiklerinde elastik davranış gösterirken yavaş yüklendiklerinde ise viskoz davranış gösterirler. Yükleme hızının ne hızlı ne de yavaş olduğu durumlarda ise viskoz ve elastik davranışların bileşimi şeklinde davranırlar (Tunç, 2004).

Bitüm viskoelastik malzeme olduğundan, sıcaklığa ve yükleme süresi bağlı olarak davranışları tam viskozdan elastik hale kadar değişiklik göstermektedir. Bu tip malzemeler yüksek yükleme hızlarında (hızlı taşıtlar) elastik, düşük yükleme hızlarında (yavaş ya da duran taşıtlar) viskoz, orta yükleme hızlarında ortak elastik ve viskoz davranış gösterirler. Ayrıca, bitüm sıcaklık değişikliklerinden etkilenmektedir. Çünkü bitümün ısıtılmasıyla elastik katıdan viskoz sıvıya dönüşmesi mümkündür. Dolayısıyla, ısı ve yükleme süresi bitümün reolojik davranışını da belirlemektedir.

Bitüm agregalarla karıştırıldığında reolojik özellikler karışıma da geçmektedir. Bu nedenle, bitüm seçimi hazırlanacak karışım için reolojik özellikler önemli olup, kaplamanın performansını etkileyecektir. Bitümlü malzemelerin hazırlama ve sıkıştırma işlemleri süresince ve yüksek hizmet sıcaklıklarında özellikleri viskoziteleri ile değerlendirilmektedir. Ancak arazideki hizmet süresinde genellikle bitümler viskoelastik davranış göstermekte olup, özellikleri rijitlik modülü ile ifade edilmektedir.

Viskoelastik malzemeler için $t=0$ yükleme anında uygulanan bir çekme gerilmesi (σ), yükleme süresi ile orantılı olmayan bir şekilde değişmeye (ϵ) sebep olur. t anındaki rijitlik modülü uygulanan gerilme ve t anında meydana gelen şekil değiştirme olarak tanımlanmaktadır. Rijitlik modülü yükleme süresi ve aynı zamanda sıcaklığa bağlı

olduğundan herhangi bir rijitlik modülünün ölçümünde hem sıcaklığı hem de yükleme süresini belirtmek gerekir.

2.2.2.1. Bitümün Isıya Duyarlılığı

Bitümlerin kıvamlılıklarının ısıya bağlı olarak değişmesi ısıya karşı duyarlı olmasından kaynaklanmakta olup, ısıya duyarlılıklarının az olması istenir. Bu nedenle yüksek hava sıcaklıklarında yeterince katı olması, çok düşük sıcaklıklarda ise çok fazla gevrek (kırılgan) olmaması istenilmektedir. Bu durum sağlanamadığı takdirde bitümlü kaplamalarda yüksek sıcaklıklarda deformasyon, düşük sıcaklıklarda ise çatlama eğilimi gösterirler. Tekerlek izi ve düşük ısı çatlaklarının oluşumunun en önemli nedeni bitümlerin bu özelliğinden kaynaklanmaktadır (Tunç, 2004). Bitümlü bağlayıcının sıcaklığa hassaslığının göstergesi penetrasyon indeksi (PI) ile belirlenmekte olup, yumuşama noktası ve penetrasyon değerine bağlıdır. Penetrasyon indeksi, sıcaklık hassasiyeti yüksek olan bitümler için -3 civarında bir değer ile sıcaklık hassasiyeti düşük olan oksitlendirilmiş bitümler için +7 civarında bir aralıkta değişir (Whiteoak, 2004).

2.2.2.2. Viskozitenin Bitümün Performans Özelliklerine Etkisi

Bitümün, sadece penetrasyon değerleri ile sınıflandırılmaları günümüz teknolojisinin gelişmeleri ışığında yetersiz kalmaktadır. Avrupa ve Amerika'da, bitüm sınıflandırılmalarında kullanılan, temel bir dayanak viskozite değerleridir. Viskozite, sıvının akmaya karşı gösterdiği dirençtir. Akış karakteristiklerinin (kıvamlılığın) bir ölçüsüdür. Bu nedenle bitümün katıldığı sıcak karışımların önemli özelliklerini (reolojik) etkilemektedir. Farklı hava sıcaklığı aralıklarında bitümün viskozitesi değişmektedir. Bu değişikliğin bitümlü kaplamada sebep olduğu sorunlar ise tekerlek izi, çatlak ve yorulma olarak karşımıza çıkmaktadır.

Hizmet aşamasında kaplama sıcaklığı yaklaşık, -25°C ile 0°C arasında iken, karışımın viskozitesi oldukça yüksektir ve bu sıcaklık aralığında düşük ısılardan dolayı, kaplamada düşük sıcaklık çatlakları oluşumu gözlenmektedir. Kaplama sıcaklığı yaklaşık 10°C ile 40°C arasında olduğunda, karışımın viskozitesi azalarak, karışım yumuşamaktadır. Bu sıcaklık aralıklarındaki karışımda, trafik yükü etkisi ile yorulma döngülerinin oluşumu artmaktadır. Kaplama sıcaklığı, 40°C'nin üstüne çıktığında ise

karışımın vizkozitesi daha da azalmakta ve kaplamada taşıtların etkilerinden dolayı tekerlek izi oluşumu hızlanmaktadır (Balta, 2004).

Ülkemizde yol yapımında kullanılan bitüm sınıflarının seçimi, kaplamanın yapılacağı bölgenin iklim koşulları göz önüne alınarak yapılmaktadır. Sıcak iklim bölgelerinde yapılacak yollarda kullanılacak bitümlü sıcak karışımlarda sert bitüm (yüksek viskoziteli), soğuk iklim bölgelerindeki kullanımlarda ise yumuşak (düşük viskoziteli) bitüm kullanılmaktadır. Bunlara ilave olarak, ağır trafikli, gece gündüz ve mevsimsel sıcaklık farklılıklarının yüksek olduğu ya da çok sıcak bölgelerde yapılacak bitümlü sıcak karışımların yapımında polimer modifiye bitüm kullanılması tercih edilmektedir (Kaşak ve diğ., 2004).

2.2.2.3. Kohezyonun Bitümün Performans Özelliklerine Etkisi

Bitümlü karışımın stabilitesi agregalar arasındaki içsel sürtünmeye ve bağlayıcının kohezyonuna bağlıdır. Kohezyon bir malzemenin kopmaya karşı koyan moleküller arası çekimi, içsel sürtünme veya içsel bağ olarak ifade edilmektedir. Bitümlerin kohezyon mukavemeti düşük ısıdaki düktiliteleri (sünme) ile karakterize edilmektedir. Düktilite standart bir kalıp içinde şekillendirilen bitüm numunesinin düktilite cihazı ile belli bir ısıda belirli bir hızla çekilerek sünmeye tabi tutulduğunda kopmanın olduğu uzunluk miktarıdır. Kohezyon, yükleme hızı (trafik hızı) ve bitümlü bağlayıcının viskozitesi arttıkça ya da kaplamanın sıcaklığı düştükçe artmaktadır (Asphalt Institute, 1996).

Bitümün düşük ısılardaki sünekliği ve kohezyon mukavemetindeki değişimi belirlenmeye çalışılarak, düşük ısılarda büzülerek gevrek davranışından dolayı oluşan düşük ısı çatlakları kontrol edilebilmektedir.

2.2.2.4. Adezyonun Bitümün Performans Özelliklerine Etkisi

Bitümün adezyon özelliği kohezyon özelliğinden farklıdır. Fakat bitümlü kaplamaların kohezyon özelliği, bitümün agregaya yapışma yeteneğine yani bitümün adezyonuna bağlıdır. Bitümün adezyonu agregaya yapışabilme yeteneği olarak adlandırılırken, bitümün kohezyonu ise yük altında aynı cins malzeme içerisinde kopmadan uzayabilme yeteneğidir. Esnek kaplamaların yüzeylerindeki kusurların büyük kısmı genellikle adezyon eksikliği veya bitümün soyulmasından kaynaklanmaktadır.

Agregayı saran bitüm filmi bir takım etkenlerle birlikte su tarafından soyulmaya başlanmakta ve trafiğin etkisiyle de soyulma artmaktadır.

Bitümün agregaya ile iyi bir adezyon yapabilmesi için viskozluğunun mümkün olduğunca az olması istenir. Böylece agregaya yüzeyine yapışabilme yeteneğini yani su gibi ıslatma gücünü kazanabilmektedir. Katı bitüm veya viskozitesi fazla olan bitümün yüzeysel çekim kuvveti oldukça düşük olup, agregaya ile yapışması güçtür. Soyulmayı önleyici katkıları agregaya ile bitüm arasındaki adezyonu artırmak amacıyla kullanılmaktadır. Soyulmayı önleyici katkı maddesinin kullanılması halinde ıslak ortamda agregaya yüzeyine yapışan bitüm küreciğinin temas açısı giderek artmakta yani bitüm küreciği agregaya yüzeyine tamamen yapışarak güçlü bir adezyon oluşturmaktadır (Tunç, 2004).

2.2.2.5. Bitümün Yüzey Gerilimi

Yüzey gerilimi, bitümlü malzemenin agregaya yüzeyine yayılma ve ıslatmasını etkileyen temel faktörlerden biridir. Islatma derecesi, bitüm moleküllerinin kendi aralarındaki çekime karşılık (bitümün kohezyon kuvveti), bitüm ve agregaya molekülleri arasındaki çekim gücüne (karışımın adezyon kuvvetine) bağlıdır. Bitümün içindeki yüksek moleküler çekim, bitümün yüksek yüzey gerilimine ve bunun sonucu olarak da düşük ıslatabilirliğe yol açmaktadır (Ünal, 1997).

2.2.2.6. Bitümün Yaşlanması

Bitümlü bağlayıcı, hizmete başlayıncaya kadar yapılan işlemlerde önemli derecede oksidasyona uğramakta ve reolojik davranışı, performansı ve dayanıklılığı büyük ölçüde etkilemektedir. Bitüm, tank içinde yüksek sıcaklıkta ve büyük bir kütle halinde iken çok az bir oksidasyon meydana gelmektedir. Bunun nedeni, oksijene maruz kalan bitüm yüzeyinin tüm kütleye oranla çok küçük olmasıdır. Ancak, bağlayıcı tank üstündeki taşıyıcı borudan geçip, belli bir mesafeden düştüğünde önemli miktarda oksidasyon meydana gelmektedir. Bunun sebebi, bir borudan tanka düşen bitümün yüzey alanının daha geniş olması sebebi ile oksijenin bitümle kolayca reaksiyona girebilmesidir (Whiteoak, 2004).

Karıştırma işlemi sırasında ise tüm agregaya ve dolgu maddeleri (filler) kalınlığı 5 ile 15µ arasında değişen bitüm filmi ile kaplanmaktadır. Bu durum, karıştırıcı (mikser) içindeki karışımın oksidasyon ve uçucu bileşenden kaynaklanan yaşlanması için oldukça

elverişlidir. Karıştırma işlemi boyunca yaklaşık olarak bitüm bir sınıf (100 pen iken 70 pen, 70 pen iken 50 pen gibi) sertleşmektedir. Bu nedenle, uygun bir bağlayıcı seçiminde karıştırma sırasındaki yaşlanmanın göz önünde bulundurulması gerekmektedir.

Karıştırma işlemi sırasındaki yaşlanma ise sıcaklık, karıştırma süresi, bitüm miktarı ve bitüm film kalınlığı gibi birçok faktöre bağlıdır. Sıcak karışımın karıştırılma sıcaklığını yükseltmek ve karıştırma süresini uzatmak karışımındaki bitümü aşırı şekilde yaşlandırır. Burada, sıcaklık kontrolü ve bitüm miktarı çok önem taşımaktadır. Plentte karışımın hazırlanması sırasında oluşan oksidasyonun derecesi, laboratuvar ortamında, Döner İnce Film Halinde Isıtma Deneyi (Rolling Thin Film Oven Test, RTFOT, ASTM D 2872, AASHTO T240) ile belirlenmeye çalışılmaktadır.

Hazırlanan karışımın depolanması sırasında meydana gelen yaşlanma karışımın sıcaklığına, bitüm film kalınlığına ve karışımın oksijene maruz kalma süresine bağlıdır. Bu nedenle, karışımların depolanması için kullanılan siloların yükleme ve boşaltma kapaklarının hava geçirmez olması önem taşımaktadır.

Uzun dönem yaşlanma sürecini kapsayan hizmet aşamasında oksidasyon çok yavaş olmaktadır. Depolama, plentte taşınma, karıştırma, serim yerine taşıma, serme, sıkıştırma esnasında toplam oksidasyonun yaklaşık %70'inin meydana geldiği ve yol üzerinde oksidasyonun yavaşladığı, uzun dönem yaşlanma sürecinde ise 8 yılda sadece toplam oksidasyonun geri kalan kısmı yani, % 30 'unun oluştuğu görülmüştür (Whiteoak, 2004).

Hizmet ömrü boyunca meydana gelen yaşlanma, karışımın sıkıştırılma derecesi (hava boşluk oranı), geçirgenliği ve agrega tanelerini saran bitüm film kalınlığı gibi faktörlere bağlıdır. Bitüm yaşlandıkça sertleşmekte, sertleşen bitümden dolayı da sıcak karışımın önemli özelliklerinden biri olan, esnekliği azalmakta, esnemeyen karışım ise üzerinde taşıdığı araçların etkilerinden ve çevre şartlarından dolayı daha kolay çatlayabilmektedir. Bitümlü karışımlarda yüksek hava boşluğu oranı, yüksek hava geçirgenliği ve agrega danelerini saran bağlayıcı filminin inceliği, kaplamanın dayanıklılığını azaltan yaşlanmanın en önemli nedenlerindendir. Hava boşluğu oranının artışı ile yaşlanmanın arttığı yapılan çalışmalarda görülmüştür. Kalın bağlayıcı filmi içeren karışımların ise daha esnek ve dayanıklı olduğu, ancak, ince bağlayıcı filmi içeren karışımların daha gevrek, kırılgan oldukları ve yolun servis ömrünü düşürdükleri sonucu ortaya çıkmıştır (Şengöz ve Ağar, 2005).

Genel olarak bitüm film kalınlığının artması ile sıcak karışımın yaşlanmaya olan direncinin arttığı kabul edilmektedir. Bitümlü sıcak karışımın yol üzerindeki hizmet

sürecindeki oksidasyonu laboratuvar ortamında, Basınçlı Yaşlandırma Kabı Deneyi (Pressure Ageing Vessel, PAV, AASHTO PP1) ile belirlenmektedir. Deney işleminin sonunda bitümün reolojik davranışını belirlemek için (akma ve deformasyonunun seviyesi), dinamik kesme, direkt çekme, sünme sertliği gibi deneyler yapılmaktadır.

2.2.3. Yapım Süresince Bitüm Özelliklerinin Performansa Etkisi

2.2.3.1. Karıştırma ve Taşıma

Karıştırma süresince, sıcak bitüm, kurutulmuş ve sıcak agregayı, belirlenmiş karıştırma koşulları altında, kısa sürede kolayca kaplayabilmelidir. Karıştırma sıcaklığı arttıkça, agregayı ince tabakalar halinde saran bitümün oksitlenmesi de artacaktır. Örneğin 30 saniyelik standart karıştırma süresi için, karışım sıcaklığındaki 5.5°C artış, bitümün yumuşama noktasında 1°C'lik yükselmeye yol açabilmektedir. Sıcak karışımın hazırlanması esnasında (yaklaşık 165°C) kullanılan bitümün vizkozitesi 0.2 Pa.s olması gerekmektedir. Karıştırma sıcaklığının artması, bitümün viskozitesini ve beraberinde oksitlenme miktarını da hızlandıracaktır. Dolayısıyla, karıştırma sıcaklığının artırılması ile elde edilen viskozitedeki azalmanın önemli bir kısmı, bitümün ilave oksitlenmesi sebebiyle kaybolacaktır. Malzemenin düşük ortam sıcaklıklarında serildiği ya da uzun mesafeler boyunca taşınması gerektiği hallerde, karıştırma sıcaklığı bu durumlardan etkilenecektir. Bitümlü malzemenin uygun şekilde yalıtıma sahip kapalı araçlar içerisinde taşınması durumunda sıcaklık kaybı saatte yaklaşık 2°C'dir (Whiteoak, 2004).

2.2.3.2. Serme ve Sıkıştırma

Malzemenin serilmesi sırasında sıcaklığında çok miktarda düşüş meydana gelir. Oluşan sıcaklık kaybı miktarına ise pek çok faktör etkilidir. Bunlardan bazıları, serilecek tabaka kalınlığı, çevre sıcaklığı, rüzgâr hızı ve malzemenin üzerine serildiği alt tabakanın sıcaklığıdır. Serilen tabakanın soğumasına bu faktörlerden en çok etkileyeni ise rüzgar hızı ile tabaka kalınlığıdır. Bir tabaka karışım serildikten sonra uygun ekipmanlar ile gereken düzeyde sıkıştırılabilmesi için uygun derecede işlenebilir olması gerekmektedir. Bu nedenle sıkıştırma sırasında, bitüm viskozitesinin 5 Pa.s ile 30 Pa.s arasında olması

istenilmektedir. 5 Pa.s değerinden düşük viskozitelerde, malzeme genellikle sıkıştırılmayacak kadar oynak, 30 Pa.s değerinden yüksek viskozitelerde ise malzeme daha fazla sıkıştırılmayacak kadar sert olmaktadır (Whiteoak, 2004).

2.2.4. Hizmet Aşamasında Bitüm Özelliklerinin Performansa Etkisi

Bitümlü karışımların serilip ve sıkıştırıldıktan sonra arazideki hizmet süresindeki davranışlarının da dikkate alınması gerekmektedir. Özellikle yanlış tasarım ve uygun malzeme kullanılmayışı kaplamanın hizmet performansını düşürmektedir. Hizmet sırasında meydana gelen problemler genellikle yüksek sıcaklıklarda oluşan (30°C ile 60°C) kalıcı deformasyon ve kuma, düşük sıcaklıklarda meydana gelen sorunlar ise çatlama ve sökülmelerdir (Çubuk, 2001).

2.3. Çalışmada Kullanılan Deney Yöntemleri

2.3.1. Agregalar Üzerinde Uygulanan Deneyler

Yol inşaatında kullanılacak agregaların özelliklerinin belirlenmesi için uygulanacak deneyler, doğrudan doğruya yolda kullanılacak agregalar üzerinde yapılmalıdır. Agregaların yol üst yapısında kullanılabilmesi için; aşınmaya ve donmaya karşı dirençlerinin, özgül ağırlık, su absorpsiyonu, soyulma değerlerinin, elek analizleri ve tane şekillerinin, sürtünme etkileri ile meydana gelecek cilalanmaya karşı olan dirençlerinin belirlenmesi gerekmektedir. Ayrıca standartlarda belirtilen şartları da sağlaması gerekir. Eğer bir agrega çeşidi bu şartları sağlayamıyorsa yol üst yapısında kullanılması çok sakıncalı sonuçlar doğuracaktır. Bu yüzden agregalar kullanılmadan önce çeşitli deneylere tabi tutulur.

2.3.1.1. Agregalardan Numune Alınması

Agregalarla ilgili deneylerin sıhhatli sonuçlar vermesi için alınacak agrega numunelerinin agregayı tam olarak temsil etmesi için yığının birçok yerinden homojen numune alınmalıdır. Bir agregadan deney için alınan numune esas agrega yığınının gereği gibi temsil edemez ise deney sonuçlarının hiçbir değeri kalmaz. Bu nedenle numunelerin

çok özenle seçilmesi gerekir. Numune, agrega hareketinde iken, belli bir zaman süresinde, kısım kısım alınmalıdır. Eğer numune bir silo içinde bulunan veya yığın halinde figüre edilmiş durumdaki agregadan alınacak ise birbirinden hayli uzak, aralıklı noktalarda derin çukurlar açıp bunların içinden malzeme alınarak yukarıda beklenen koşullar sağlanabilir. Bu malzeme sonra iyice karıştırılır. Elde edilen karışımdan deney için gereken miktarda agrega numune ayırıcı bölgeçler yardımıyla azaltılarak alınır (Umar ve Ağar, 1991).

2.3.1.2. Dane Boyutu (Elek Analizi) Deneyi

Elek analizi deneyi ASTM E 11-87 ile tanımlanan deney yöntemi olup, standartta nitelikleri verilmiş olan elekleri kullanarak agreganın tane büyüklüğü dağılımının tespit edilmesini kapsar. İri daneler için elek analizi, ince daneler için çöktürme metodu uygulanarak yapılır. Elek analizi granülometri deneyi, numuneleri elekler üzerinde en az 2 dakika sarsmak ve her elek üzerinde kalan agregayı tartmak suretiyle belirtilir. Elek analizinde eleğin fazla yüklenmesi önemli hatalara neden olabilir. Elek üzerindeki numune ağırlıkları ve dane boyutları şartnamelerde sınırlandırılmıştır. Sonuçlar her elekten geçen agrega miktarının toplam numunenin ağırlıkça yüzdesi veya birbirini izleyen iki elek arasında kalan numune ağırlığı yüzdesi ile belirtilir ve bir grafikte gösterilir (Umar ve Ağar, 1991).

2.3.1.3. Aşınma (Los Angeles) Deneyi

Aşınma deneyi ASTM C131 ve TS 3694 standardı ile tanımlanır ve bu deney ile agregaların aşınmaya karşı dayanıklılığını belirlenir. Kaba agreganın aşınması, aşındırıcı bir yük kullanılarak *Los Angeles* deney aleti ile tespit edilir. Los Angeles deney aleti; iki ucu kapalı, iç çapı 71.1 cm ve iç uzunluğu 50.8 cm olan içi boş çelik bir silindirden oluşur. Silindir, içinden geçmeyen aksla yatay durumda dönmeyi sağlayacak şekilde yapılmıştır. Silindir üzerinde özel bir kapak vardır. Bu kapak, toz çıkmasına mani olacak ve silindirin iç yüzeyine tamamen uyacak şekilde bulonlarla sıkıca kapatılabilmektedir. Tamburun iç yüzünde silindir eksenine paralel olmak üzere 9 cm genişliğinde ve silindir boyunca uzanan yeter kalınlıkta ve deformasyon yapmayacak şekilde yerleştirilmiş çelik siper bulunur. Bu siper, örnek koyma deliğinden dönme doğrultusunda en az 127 cm uzaklıktadır. Aşınma yükleri yaklaşık olarak 4.68 cm çapında dökme demir veya çelik

küreler kullanılır. Her birinin ağırlığı 390 ile 445 gram kadardır. Hazırlanacak numune 5000 g., temiz ve 105-110 °C etüvde sabit ağırlığa gelinceye kadar kurutulmuş olmalıdır (Umar ve Ağar, 1991).

Tablo 2.5’de deneyde kullanılacak çelik küre sayıları ve çelik küre ağırlıkları toplamı, Tablo 2.6’da ise aşınma direncinin çelik küreli tamburla tayini için gerekli deney numunesi tipleri ve deney numunesi miktarları verilmiştir.

Tablo 2.5. Aşınma deneyinde kullanılacak çelik küre özellikleri (TS 3694, 1981).

Numune Tipi	Çelik Küre Sayısı	Çelik Küre Ağırlıkları Toplamı (gr)
A	12	5000 ± 25
B	11	4575 ± 25
C	8	3325 ± 20
D	6	2500 ± 15
E	12	5000 ± 25
F	12	5000 ± 25
G	12	5000 ± 25

Tablo 2.6. Aşınma deneyi için numune tipleri ve numune miktarları (TS 3694, 1981).

Tane Sınıfı (mm)	Deney numunesi tipi ve miktarı (gr)							Ağırlık toleransı (%)
	A	B	C	D	E	F	G	
90/63					2500			
63/45					2500			
45/31.5					5000			
31.5/22.4	1250					5000		
22.4/16	1250					5000		
16/11.2	1250	2500					5000	
11.2/8	1250	2500					5000	±2
8/5.6			2500					
5.6/4			2500					
4/2				5000				
Toplam	5000	5000	5000	5000	10000	10000	10000	

Tane sınıflarına ayrıldığında en az Tablo 2.6’da gösterilen miktarları sağlayacak miktarda agrega numunesi TS 707 standardına uygun olarak küçültülür. Yıkayıp, elenerek tabloda belirtilen tane sınıflarına ayrılır. Her tane sınıfı etüv durumuna getirildikten sonra

oluşturulması istenen numune tipi için gerekli olan ve Tablo 2.6’da gösterilmiş olan miktarları tartımla ayrılarak bilyalı tambura konur. Numune tipine uygun çelik küre sayısı ve ağırlıkları Tablo 2.5 yardımıyla belirlenir ve tamburun içine atılır. Tamburun penceresini örten kapak sıkıca kapatıldıktan sonra hızı dakikada 30-33 dönüş olacak şekilde 100 dönüş yaptırılır. Aygıt durdurulur. Deney numunesi dışarıya alınır. 1.4 mm’lik elekte elenir. Elek üstünde kalan agrega 1 gr duyarlılıkla tartılır. Elek üstünde kalan ve elekten geçen agregalar ve çelik küreler tekrar tambura konur. A, B, C, D tipi numunelere ilk 100 dönüş ek olarak 400 dönüş, E, F ve G tipi numunelerde ise ilk 100 dönüş ek olarak 900 dönüş daha yaptırılır. Aygıt durdurulduktan sonra aşınmış deney numunesi dışarıya alınır. 1.4 mm’lik elekten elenir. Elek üzerinde kalan agrega tartılır. Numunenin ağırlık kaybı (ilk ve son ağırlıkları farkı) hesaplanır. Ağırlık kaybının ilk ağırlığa oranı aşınma yüzdesini verir (TS 3694, 1981).

2.3.1.4. Hava Tesirlerine Karşı Dayanıklılık (Donma-Çözülme) Deneyi

Bu deney ASTM C88 ve TS 3655 standartları ile tanımlanır ve agregaların doygun sodyum sülfat veya magnezyum sülfat çözeltileri ile ufalanmaya karşı dayanıklılığının saptanmasını kapsar. Agregaların hava etkileri ile donarak ufalanmaya karşı olan dirençleri hakkında, laboratuvarında kısa süre içinde bir karar verebilmek amacı ile uygulanan hızlandırılmış bir deneydir.

Sodyum sülfat eriyiği hazırlanırken 1 litre suya 250 gr sodyum sülfat tuzu konur. Magnezyum sülfat kullanılması halinde konulan tuz miktarı 350 gramdır. Şartnamede belirtilen sınırlar içinde kalacak şekilde elenmiş ve 110°C’lik etüvde kurutulmuş olan agrega numunesinden belirli miktarda alınarak tel sepetler veya elekler üzerine konur. Üstü en az 2 cm kaplanacak şekilde doygun sodyum sülfat veya magnezyum sülfat çözeltisi içine daldırılır. Kabın üzeri kapatılır. Sıcaklığı 21°C olan bir ortamda 16–18 saat arasında bekletilir. Daldırma süresi sonunda agrega numunesi çözeltiden çıkarılarak 15 dakika süzmeye bırakılır ve 110°C’lik etüvde sabit ağırlığa kadar kurutulur. Etüvden çıkarılınca oda sıcaklığına kadar soğutulur. Numune ikinci kez çözeltiye daldırılarak yukarıda açıklanan işlemler tekrarlanır. Çimento betonunda ve bitümlü karışımlarda kullanılan agregalar için bu daldırma-kurutma işlemleri 5 kez tekrarlanır. Her kurumadan sonra danelerin durumu, yani dağılma, çözülme, ayrılma, ufalanma ve çatlama olup olmadığı gözlenir. 5. devre sonunda etüvden çıkan numune soğutulup çözelti temizleninceye kadar

su ile yıkanır. Daha sonra numuneler 110°C'lik etüvde sabit ağırlığa kadar kurutulup, tartılır. Deneyden önceki ağırlıkla olan farkı alınır. İlk ağırlığa bölünür. Donma kaybı bulunur. Bu max % 12 olmalıdır (Umar ve Ağar, 1991).

Tablo 2.7'de donma deneyi için gerekli olan agrega ağırlıkları, Tablo 2.8'de ise don deneyi için gerekli olan soğutma ve donma süreleri verilmiştir.

Tablo 2.7. Donma deneyi için gerekli numune miktarı (TS 3655).

Tek tane sınıfı anma büyüklükleri (mm)	Yaklaşık deney numunesi miktarı (gr)	
	Soğutma yönteminde	Kimyasal yöntemde
4/8	1000	300
8/16	2000	500
16/32	4000	500
32/63	6000	1000

Tablo 2.8. Donma deneyi için gerekli soğutma ve donma süreleri (TS 3655).

Sıcaklık düşmesi	Tolerans	Süre (saat)
20°C 'den 0°C'ye	± 1	2
0°C bekleme	± 1	3
0°C'den -15°C'ye	± 1	2
-15°C'den -20°C'ye	± 1	4
Toplam		11

2.3.1.5. Özgül Ağırlık ve Su Emme Deneyi

Özgül ağırlık, birim hacimdeki numune ağırlığının aynı hacimdeki +4°C deki suyun ağırlığına oranı olarak tanımlanır, boyutsuz bir değerdir. Danenin hacim tanımlamasına bağlı olarak genellikle kuru hacim özgül ağırlık ve zahiri hacim özgül ağırlık tanımlamaları yapılır. Zahiri özgül ağırlık geçirimsiz boşluklarla beraber katı dane hacmini, kuru hacim özgül ağırlık ise asfalt absorbe eden boşluklar dışındaki tüm hacmi kapsar. Ayrıca kuru hacim özgül ağırlığının diğer şekli doygun esasa göre hacim özgül ağırlığıdır. Özgül ağırlık deneyleri ince ve iri agregalar için farklı yapılır (Umar ve Ağar, 1991).

Kaba agreganın özgül ağırlığı:

TS 707'ye uygun olarak oluşturulan deney numunesi, içinde yaklaşık 20°C deki su bulunan bir kap içine konur ve hafifçe sallanarak, taneler üzerindeki toz ve yabancı maddelerden temizlenir. Su içinde 24 saat bekletildikten sonra çıkarılır, suyu süzülür ve tanelerin üzerlerinde gözle görülebilen su tabakası (film) kalmayıncaya kadar bezle kurutulur. İri taneleri teker teker kurulamak gerekebilir. Bu sırada aşırı buharlaşmaya yer verilmemelidir. Kurutma biter bitmez numune hemen tartılarak (B) doymun kuru yüzey ağırlığı (B) bulunur. Doymun kuru yüzey halindeki numune tartıdan hemen sonra kafes örgülü tel sepete konarak su dolu kovanın içine su yüzeyinden en az 5 cm daha aşağıda kalacak şekilde daldırılır. Su yüzeyine çıkarılmadan kovanın içinde en az 10 kez sertçe kaldırılıp indirilerek sağa sola sallanarak taneler arasında kalabilecek hava kabarcıkları çıkarılır. Daha sonra sepetin kova kenarına dokunmamasına dikkat edilerek özel düzenle terazi kafesinin ortasına yerleştirilir ve doymun malzemenin sudaki ağırlığı (C) bulunur. Numune sudan çıkarılır ve etüv kurusu durumuna getirilir. Oda sıcaklığına kadar soğutulur ve havadaki kuru ağırlığı (A) kaydedilir (TS 3526, 1980).

$$\text{Hacim Özgöl Ağırlık} = \frac{A}{(B-C)} \quad (2.1)$$

$$\text{Doymun Esasa Göre Hacim Özgöl Ağırlık} = \frac{B}{(B - C)} \quad (2.2)$$

$$\text{Zahiri Özgöl Ağırlık} = \frac{A}{(A - C)} \quad (2.3)$$

$$\text{Su Emme Yüzdesi} = \frac{(B - A)}{A} \cdot 100 \quad (2.4)$$

Agreganın su emme değeri, (kuru ağırlığın yüzdesi cinsinden) doymun numune ağırlığı ile etüvde kurutulmuş numune ağırlığı arasındaki farkın, bu sonuncu ağırlığa oranı olarak elde edilir. Su emme değeri, normal yol kaplaması agregaları için % 0.2-2.0 arasında değişir. Temel tabakasında kullanılan bazı agregalar için % 4'e kadar çıkabilir.

İnce agreganın özgül ağırlığı:

İnce agregası 24 saat suda bırakılır. Ertesi gün kohezyonunu kaybedinceye kadar kurumaya terk edilir. Sonra bu haldeki malzemeden 500 gr alınır ve (V) hacmindeki piknometreye konularak piknometre doluncaya kadar üzerine su ilave edilir. Kullanılan su damıtılmış olup, belli bir sıcaklıktadır. İlave edilen su ağırlığı (W) gr. olsun. Piknometre

içindeki malzeme alınır ve etüvde kurutularak tartılır (A) gr. Buna göre özgül ağırlıklar aşağıdaki şekilde hesaplanır (Umar ve Açar, 1991).

$$\text{Hacim Özgül Ağırlık} = \frac{A}{(V - W)} \quad (2.1)$$

$$\text{Doygun Esasa Göre Hacim Özgül Ağırlık} = \frac{500}{(V - W)} \quad (2.2)$$

$$\text{Zahiri Özgül Ağırlık} = \frac{A}{V - W - (500 - A)} \quad (2.3)$$

$$\text{Su Emme Yüzdesi} = \frac{(500 - A)}{A} \cdot 100 \quad (2.4)$$

Tablo 2.9’da en büyük dane büyüklüğüne göre ince agrega için gerekli olan numune miktarları verilmiştir.

Tablo 2.9. Özgül ağırlık tayini için gerekli deney numunesi miktarları (TS 3526, 1980).

En büyük dane büyüklüğü (mm)	0.25	0.50	1	2	4	8	16	31.5	63	90	125
Deney numunesi miktarı (kg)	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	1.5	2	3	5	5	5

2.3.2. Bağlayıcılar Üzerinde Uygulanan Deney Yöntemleri

2.3.2.1. Penetrasyon Deneyi (TS 118 EN 1426)

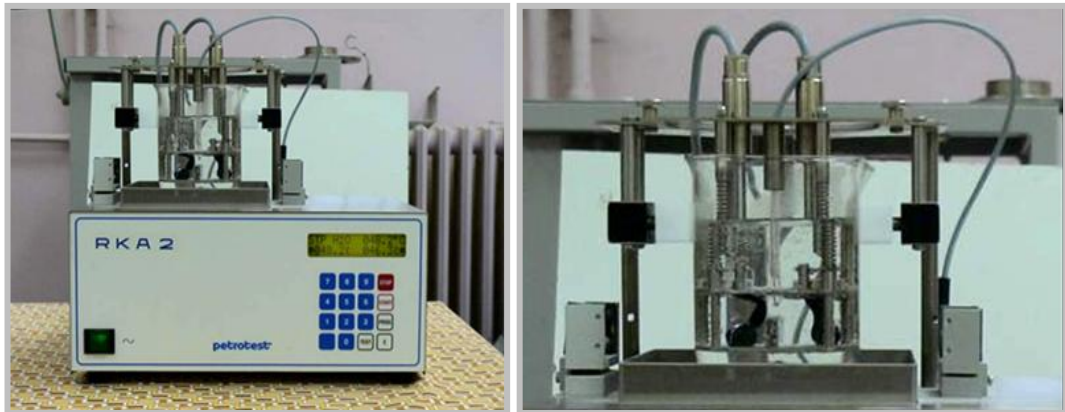
Penetrasyon deneyi ile bitümün sertliği veya kıvamı tespit edilmektedir. Penetrasyonun kelime anlamı, batma veya içe girme demektir. Standart penetrasyon deneyi, 100 gr. ağırlığındaki bir iğnenin 25°C sıcaklıkta ve 5 saniye süreyle bitüm içerisinde dikey olarak kat ettiği mesafe olarak tanımlanmaktadır (TS 118 EN 1426, 2002). Penetrasyonun birimi 10⁻¹mm. dir. Bitümün penetrasyon değeri kıvamla ters orantılıdır, penetrasyon yükseldikçe asfalt yumuşar. Asfalt çimentosunun kıvamlılığı arttıkça karışım içerisindeki agregaları birbirine daha kuvvetle bağlayacağı doğaldır. Penetrasyon deney aleti Şekil 2.5’de gösterilmiştir.



Şekil 2.5. Penetrasyon deney aleti

2.3.2.2. Yumuşama Noktası Deneyi (TS 120 EN 1427)

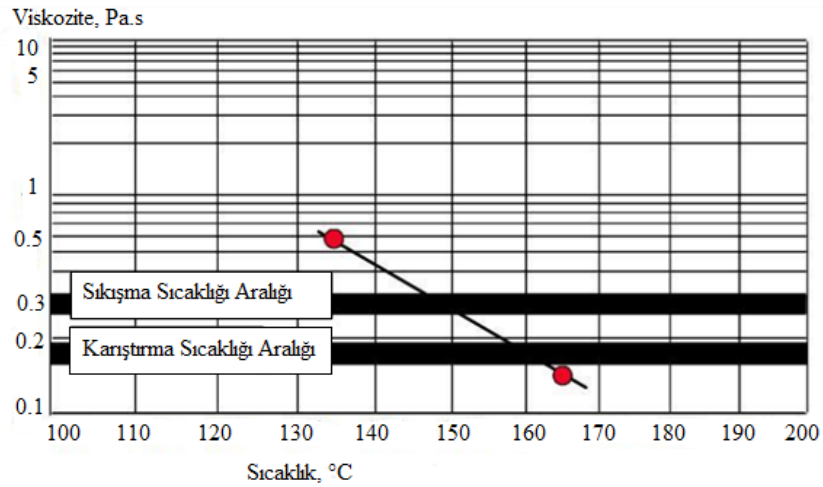
Bitümün sıcaklık değişmelerine karşı olan duyarlılıklarını ölçmek veya yumuşama sıcaklığını tespit etmek amacıyla yapılan bir deneydir. Bu deneyde bir su banyosu içinde standart halka (kalıp) bitüm doldurularak düzeneğe yerleştirilmekte ve bitüm üzerine standart bir bilye bırakılmaktadır. Deney başlangıç sıcaklığı 5°C'dir. Deney boyunca sıcaklık dakikada 5°C arttırılmaktadır. Yumuşama noktası değeri, bitümlü malzemenin tabana değdiği anda termometrenin okunan sıcaklık değeridir (TS 120 EN 1427, 2002). Otomatik yumuşama noktası deney aleti Şekil 2.6'da görülmektedir.



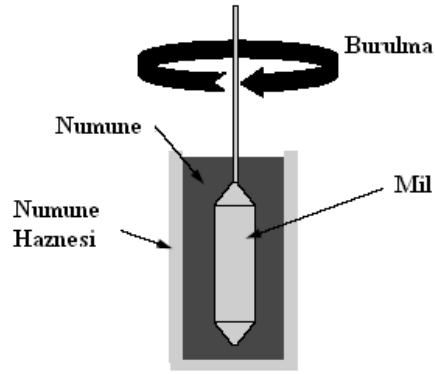
Şekil 2.6. Yumuşama noktası deney aleti

2.3.2.3. Dönel Viskozimetre Deneyi

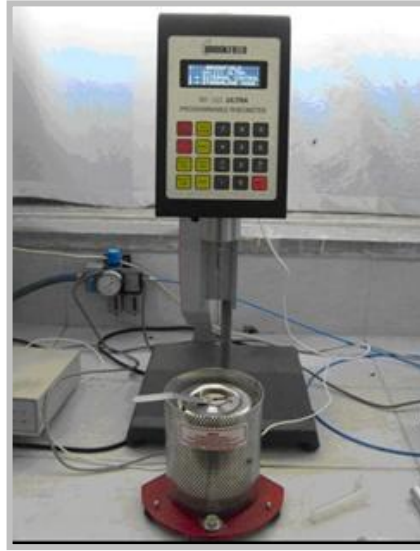
Dönel viskozimetre deneyi bağlayıcıların yüksek sıcaklıklardaki işlenebilirliğini ve akışkanlık karakteristiklerini belirlemek amacıyla kullanılmaktadır. Yüksek sıcaklıktaki bağlayıcı viskoziteleri, bitümlü bağlayıcıların pompalama ve karıştırma sırasında yeterli derecede akışkan olup olmadıklarını belirlemek amacıyla yapılmaktadır. Bu nedenle dönel viskozimetre deneyi yaşlandırılmamış bağlayıcılar üzerinde uygulanmaktadır. Superpave şartnamesine göre 135°C sıcaklıkta ölçülen dönel viskozite değerinin 3 Pa.s'yi (3000 cP) aşmaması gerekmektedir. Dönel viskozite değeri, bir milin sabit bir sıcaklıkta bağlayıcı numunesi içinde kendi etrafında dönüş hızını sabit tutacak burulma kuvvetinin ölçülmesi ile belirlenmektedir. Dönel viskozimetre aynı zamanda bitümlü sıcak karışımların karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarını seçmek amacıyla viskozite değerlerine karşılık gelen sıcaklık aralıklarını belirlemek amacıyla kullanılmaktadır. Karıştırma ve sıkıştırma sırasında işlenebilirlik bakımından gerekli viskozite değerlerini sağlayan sıcaklık aralıklarını belirlenebilmesi için dönel viskozimetre deneyinin iki farklı sıcaklıkta yapılması gerekmektedir. Asfalt enstitüsü, bu amaçla ilk deneyin 135°C'de ikincisinin ise 165°C sıcaklıkta yapılması gerektiğini belirtmiştir. Karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları çizilen viskozite-sıcaklık grafiğinden belirlenmektedir. Tipik bir viskozite-sıcaklık grafiği Şekil 2.7'de görülmektedir. Buna göre karıştırma için 170 ± 20 cP, sıkıştırma için 280 ± 30 cP viskozite değerlerine karşılık gelen sıcaklık değerlerinin kullanılması öngörülmüştür. Çalışmada kullanılan Brookfield DV-III Ultra viskozimetresi Şekil 2.9'da görülmektedir.



Şekil 2.7. Viskozite değerleri ile karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarının belirlenmesi (Zaniewski ve Pumphrey, 2004).



Şekil 2.8. Dönel viskozimetre deney şeması

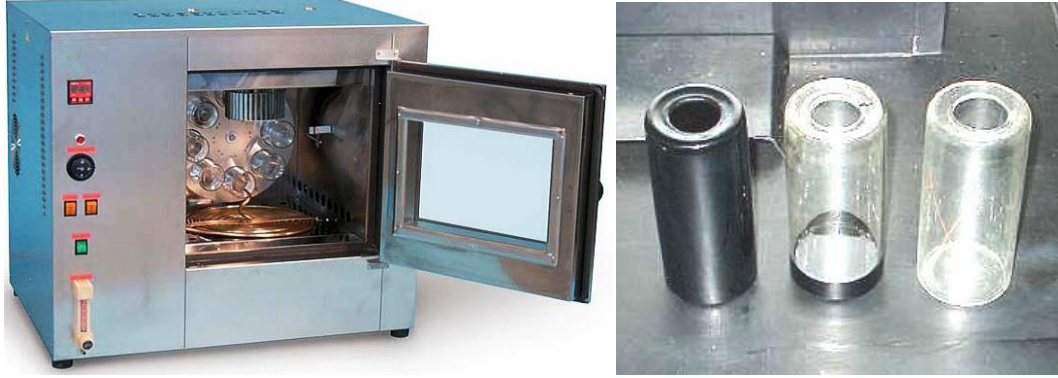


Şekil 2.9. Brookfield DV-III ultra dönel viskozimetresi

2.3.2.4. Dönel İnce Film Halinde Isıtma Deneyi (RTFOT)

Bağlayıcıların karıştırma ve yapım süresindeki yaşlanması, laboratuvarında RTFOT (Dönel İnce Film Halinde Isıtma Deneyi) ile temsil edilerek kütle kaybı olarak belirlenmektedir. Bu deneyde asfalt hazırlama tesislerinde karıştırma sırasında bitümlü bağlayıcının maruz kaldığı sertleşmeyi temsil edecek şekilde, ince bir film halinde hareket eden bitümlerin veya bitümlü bağlayıcıların üzerinde, sıcaklık ve havanın birleşik etkisini değerlendirmektedir. RTFOT yöntemi ile bağlayıcıların ısıtma sonucu uçucu madde kaybı belirlenebilmekte ayrıca sıcaklık ve havanın etkisiyle bitümlü malzemelerin fiziksel özelliklerindeki değişimi tespit etmek amacıyla gerekli malzeme elde edilebilmektedir. TS

EN 12607-1’de belirtilen bu deney, 163°C sıcaklığa sahip etüve yerleştirilen 8 adet şişe kullanılarak yapılmaktadır (Şekil 2.10).



Şekil 2.10. Dönel ince film halinde ısıtma deney cihazı (RTFOT) ve şişeleri

Deneyde, her bir şişeye 35 gr. bitüm doldurulup düşey ekseninde dakikada 15 devir yapacak şekilde 75 dakika süreyle döndürülmektedir. Dönme esnasında deney aletinin tabanındaki bir hava üfleyici ile şişelere, akışı 4000 ± 200 mL/dak olacak şekilde hava verilmektedir. Dönme hareketi, sıcaklık ve verilen havanın etkisiyle bitüm, şişelerin iç yüzeyini tam olarak kaplayarak ince bir film tabakası oluşturmakta ve bu sayede yaşlanmanın meydana gelişi oluşturulmaktadır. Bu sürenin sonunda iki numune kütle kaybını tayin etmek amacıyla, geri kalan altı şişe ise bitümlü malzemelerin yaşlandıktan sonraki fiziksel özelliklerini tespit etmekte kullanılmaktadır. Kütle kaybı (%) 2.5 formülü kullanılarak belirlenmektedir. (TS EN 12607-1, 2003).

$$\text{Kütle Kaybı, \%} = \frac{M_1 - M_2}{M_1} \times 100 \quad (2.5)$$

Burada, M_1 yaşlanmadan önceki ağırlığı, M_2 ise yaşlanmadan sonraki ağırlığı ifade etmektedir.

2.3.3. Karışımlar Üzerinde Uygulanan Deneyler

2.3.3.1. Karışımların Optimum Bitüm İçeriğinin Belirlenmesi

BSK'ların dizayn edilmesinde Marshall metodu olarak bilinen Marshall stabilite ve akma deneyi kullanılmaktadır. Bu metot, "American Society for Testing and Materials" tarafından standart haline getirilmiş ve metot ASTM D-1559'da verilmiştir. Ülkemizde de bu deney TS EN 12967-34 standardına göre yapılmaktadır. Bu standartta stabilite; yükleme sonucu meydana gelen deformasyona karşı maksimum dayanım miktarı olarak, akma ise yükleme esnasında maksimum yüke ulaşıldığı andaki numunede meydana gelen deformasyon miktarı olarak tanımlanmaktadır.

2.3.3.1.1. Marshall Stabilite Deney Numunelerinin Hazırlanması

Deney numuneleri 63.5 ± 1.27 mm (2.5 inç ± 0.05 inç) yüksekliğinde briket hazırlayabilecek miktarda (yaklaşık 1200 gr) agrega numunesi ile önceden belirlenmiş miktarda bitüm ile hazırlanır (Önal ve Kahramangil, 1993). Marshall stabilite sıkıştırma aleti ve numunelerin kalıptan çıkarılması Şekil 2.11'de görülmektedir.



Şekil 2.11. Marshall stabilite sıkıştırma aleti ve numunelerin kalıptan çıkarılması

Karıştırma sıcaklığı, asfalt çimentosu ve sıvı petrol asfaltın $170\pm 20^{\circ}\text{C}$ viskozite oluşacak şekilde ısıtılacağı sıcaklıktır. Numuneler 101.6 mm (4 inç) çapında ve 76.2 mm (3 inç) yüksekliğindeki numune kalıbında, 457.2 mm (18 inç)'den düşen 4536 gr (10 lb) ağırlığındaki özel bir tokmakla sıkıştırılır. Numunenin her iki yüzüne trafik durumuna göre orta trafik için 50, yüksek trafik için ise 75 darbe vurularak sıkıştırılması sağlanır. Şekil 2.12'de sıkıştırılarak hazırlanmış deney numuneleri görülmektedir.



Şekil 2.12. Marshall stabilite deney numuneleri

2.3.3.1.2. Marshall Stabilite Deneyi (ASTM D 1559-89, TS EN 12697-34)

Bu metot, Marshall Stabilite deney aleti yardımıyla bitümlü kaplama karışımlarından hazırlanan silindirik briketlerin yanal yüzeylerine yükleme yaparak plastik akmaya karşı direncin ölçümünü kapsar (ASTM D 1559-89, 1992). Ülkemizde karayolu tasarım çalışmalarında bitümlü karışımlara Marshall stabilite deneyi uygulanmaktadır. Bu deney esas olarak bir serbest basınç deneyi olup numune yüklendiği sırada tamamen sınırlanmaz (Umar ve Ağar, 1991).

Marshall deney numuneleri 12 saat oda sıcaklığında bekletildikten sonra yükseklikleri ölçülerek kaydedilir ve havada, suda ve doymuş-yüzey kuru ağırlıkları tartılır ve deneye alınır. Numuneleri istenilen sıcaklığa getirmek için 40-60 dakika su banyosunda veya 2 saat etüvde bekletilir. Banyo veya etüv sıcaklığı asfalt çimentolu briketler için $60\pm 1^{\circ}\text{C}$ 'dir. Numunenin yerleştirileceği çelik bir halka (kıрма çenesi) de $60\pm 1^{\circ}\text{C}$ sıcaklıktaki suda 30 dakika veya $60\pm 1^{\circ}\text{C}$ sıcaklıktaki etüvde 1 saat bekletilir. Numune sudan çıkarılarak çelik bir halkanın iki segmanı arasına ortalanarak yerleştirilir.

Numunenin kırma çenesinin alt ve üst parçalarına tam temas etmesine dikkat edilmelidir. Kırma çenesi yerleştirilen numuneyle birlikte Marshall stabilite deney aletine yerleştirilir.

Kırma çenesi üzerine akma ölçer (flowmeter) yerleştirilerek sıfırlanır. Deneyde; kırma çenesinin üst parçası sabittir. Alt parça ile numuneye maksimum yüke erişinceye kadar, dakikada 50 ± 2 mm'lik (2 inç) bir hızla yükleme yapılır. Deney sonunda maksimum yük değeri ölçülerek kaydedilir. “Marshall Stabilitesi” adı verilen bu değer numunenin kırılmasını sağlayan kg cinsinden toplam yük miktarıdır. Kırılma sırasında numunenin çökme ya da hareket miktarı da ölçülür. Buna “Akma” denir. Deney numunesinin su banyosundan çıkarılıp, maksimum yük saptamasına kadar geçen süre 40 s.'den fazla olmamalıdır. Ayrıca bu deneyle karışımın birim ağırlığı, boşluk oranı ve bağlayıcı ile dolu bulunan agrega boşluğu yüzdesi de saptanır (Umar ve Ağar, 1991).

Numune yüksekliği 63.5 mm'den (2 1/2 inç) farklıysa aşağıdaki bağıntı (Formül 2.6) yardımıyla tespit edilen Marshall Stabilite düzeltme katsayıları kullanılarak yüke düzeltme faktörü uygulanır (ASTM D 1559-89, 1992; TS EN 12697-34, 2007).

$$c = 5,24x e^{(-0,0258xh)} \quad (2.6)$$

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

Marshall stabilitesi değerinin akma değerine bölünmesi ile Marshall oranı (MQ) belirlenmektedir. Marshall oranı, karışımın sertliğinin ve asfalt betonunun deformasyona karşı direncinin bir göstergesidir (Hınıslioğlu ve Ağar, 2004; Yılmaz ve Kök, 2009).

Bitümlü sıcak karışımların nem hasarına karşı dayanımlarını belirlemek amacıyla uygulanan deney yöntemlerinden biri Kalıcı Marshall Stabilitesi yöntemidir. Bu yöntemde numuneler $60 \pm 1^\circ\text{C}$ sıcaklığa sahip su banyosunda 24 saat bekletildikten sonra Marshall deneyine tabi tutulmaktadır (Aksoy vd., 2005). 24 saat 60°C suda bekletilen numunelerin Marshall değerinin normal Marshall değerine oranlanması ile Kalıcı Marshall Stabilitesi

belirlenmektedir. Kalıcı Marshall stabilitesi değerinin yüksek olması bitümlü sıcak karışımların nem hasarına karşı dayanımlarının da yüksek olacağını göstermektedir. Marshall stabilite deney aleti ve deney numunelerinin su banyosunda bekletilmesi şekil 2.13’de görülmektedir.



şekil 2.13. Marshall stabilite deney aleti ve deney numunelerinin su banyosunda bekletilmesi

2.3.3.1.3. Optimum Bitüm İçeriğinin Belirlenmesi

Optimum bitüm içeriğinin tayin edilebilmesi için çeşitli bitüm yüzdelerinde hazırlanmış olan numunelere ait Marshall stabilite, birim ağırlık, bağlayıcı ile dolu agrega boşluğu yüzdesi ve boşluk oranı grafiklerinin çizilmesi gerekir. Asfalt imentosunun Marshall stabilite değerini maksimum yaptığı değer, maksimum birim ağırlığı veren asfalt imentosu oranı, şartnameye uygun olarak bağlayıcı ile dolu agrega boşluğu yüzdesini % 70 olarak sağlayan bağlayıcı oranı % 4 boşluk oranını (şartnamede belirtilen % 3-5 arasındaki sınır içinde kalan) sağlayan asfalt oranı grafiklerden bulunur. Bulunan dört asfalt oranının ortalaması optimum asfalt imentosu oranını verecektir. Bu orana tekabül eden akma değeri akma-bitüm grafiğinden bakılarak, şartnamede belirtilen değerlerin (10-20) (1/100 inç), (2-4 mm) arasında olup olmadığı kontrol edilir. Bu şekilde saptanan bağlayıcı oranına göre gerçekleştirilen bir beton asfalt karışımı şartnamelerde aranan özellikleri taşıyacaktır.

2.3.3.1.4. Çalışmada Kullanılan Bağıntılar

Farklı Bitüm Miktarlarında Karışımın Maksimum Özgöl Ağırlığı:

Bitüm miktarının değişmesi, bitüm absorpsiyonunu önemli ölçüde değiştirmediğinden, her bir bitüm yüzdesi için maksimum özgül ağırlık Formül 2.7 ile hesaplanmaktadır.

$$D_T = \frac{100}{\frac{100}{G_e} + \frac{W_b}{G_b}} \quad (2.7)$$

D_T = Bitümlü karışımının boşluksuz maksimum özgül ağırlığı (kN/cm^3)

W_b = Karışım ağırlığının yüzdesi olarak bitüm içeriği (%)

G_e = Agreganın efektif özgül ağırlığı (kN/cm^3)

G_b = Bitüm özgül ağırlığı (kN/cm^3)

Sıkıştırılmış Kaplama Karışımındaki Boşluk Hacmi Yüzdesi:

Agregalar arası boşluk yüzdesi (VMA), efektif bitüm miktarını ve hava boşluğunu içeren, sıkıştırılmış kaplama karışımının agregada daneleri arasındaki boşluk olarak tanımlanır ve toplam hacmin yüzdesi olarak hesaplanır (Formül 2.8).

$$WMA = 100 - \frac{D_p}{G_{sb}} \times \frac{100}{100 + W_a} \times 100 \quad (2.8)$$

VMA = Agregalar arası boşluk yüzdesi (%)

D_p = Sıkıştırılmış karışımın hacim özgül ağırlığı (kN/cm^3)

G_{sb} = Agreganın hacim özgül ağırlığı (kN/cm^3)

W_a = Agregada ağırlığının yüzdesi olarak bitüm içeriği (%)

Sıkıştırılmış Karışımındaki Hava Boşluğu ve Asfaltla Dolu Boşluk Yüzdesinin Hesaplanması:

Sıkıştırılmış kaplama karışımı içindeki hava boşluğu, kaplanmış agregada daneleri arasındaki küçük hava boşluklarından ibarettir (Formül 2.9, 2.10).

$$V_h = \frac{D_T - D_p}{D_T} \times 100 \quad (2.9)$$

$$V_f = \frac{WMA - V_h}{WMA} \times 100 \quad (2.10)$$

V_h =Toplam hacmin yüzdesi olarak sıkıştırılmış karışımdaki hava boşluğu (%)

V_f =Asfaltla dolu boşluk yüzdesi (%)

D_T = Bitümlü karışımının boşluksuz maksimum özgül ağırlığı (kN/cm³)

D_p =Sıkıştırılmış karışımın hacim özgül ağırlığı (kN/cm³)

2.3.3.2. Nem Hasarına Karşı Dayanım Deneyi (AASHTO T 283)

Bitüm ile agrega arasındaki adezyon, uzun vadede kaplamanın performansının yüksek olmasını sağlayan en önemli parametrelerden biridir. Bitüm ile agrega arasına giren su, adezyonun azalmasına ve dolayısıyla BSK kaplamalarda erken bozulmalara neden olmaktadır. Bitümlü sıcak karışımların nem hasarına karşı dayanımına agrega özellikleri, bitüm özellikleri, çevresel etkenler, trafik, drenaj ve yapım aşamasındaki özen gibi birçok parametre etki etmektedir.

Bitümlü sıcak karışımların nem hasarına karşı dayanımlarını belirlemek amacıyla AASHTO T 283 standardında yer alan prosedür uygulanmaktadır. Bu deney bir performans deneyi olmamakla birlikte, karışımın nem hasarına karşı dayanımını belirlemede ve katkının etkisini incelemeye kullanılmaktadır. Bu deney prosedüründe %7 ±0.5 hava boşluğuna sahip olacak şekilde en az 6 adet numune kullanılmaktadır. Hazırlanan numuneler eşit hava boşluğuna sahip olacak şekilde iki gruba ayrılmakta, birinci grupta bulunan numuneler koşullandırma işlemine tabi tutulmaktadır. Koşullandırma işlemi uygulanacak numuneler saf su içeren piknometre içerisine konularak 10-26 in.Hg. (13-67 kPa) vakum uygulanmaktadır. Vakum işlemi numunelerdeki hava boşluklarının %70-80'i su ile doluncaya kadar devam etmektedir. Yaklaşık 5 dakikalık vakum işleminden sonra boşlukların su ile dolma oranı %70'ten az olması durumunda vakum işlemine devam edilmeli, %80'den fazla olması durumunda ise tahribat olması nedeniyle bu numuneler deneylerde kullanılmamalıdır (AASHTO T 283, 2003). Piknometre ve vakum aleti Şekil 2.14'de görülmektedir.



Şekil 2.14. Piknometre ve vakum cihazı

Numunelerin doygunluk derecesi aşağıdaki formüller (Formül 2.11, 2.12, 2.13) yardımıyla belirlenmektedir.

$$J = B' - B \quad (2.11)$$

J: Absorbe su hacmi (cm³)

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

B : Vakum işleminden önce numunenin kuru ağırlığı (gr)

$$S' = J / I * 100 \quad (2.12)$$

$$I = V_a * V / 100 \quad (2.13)$$

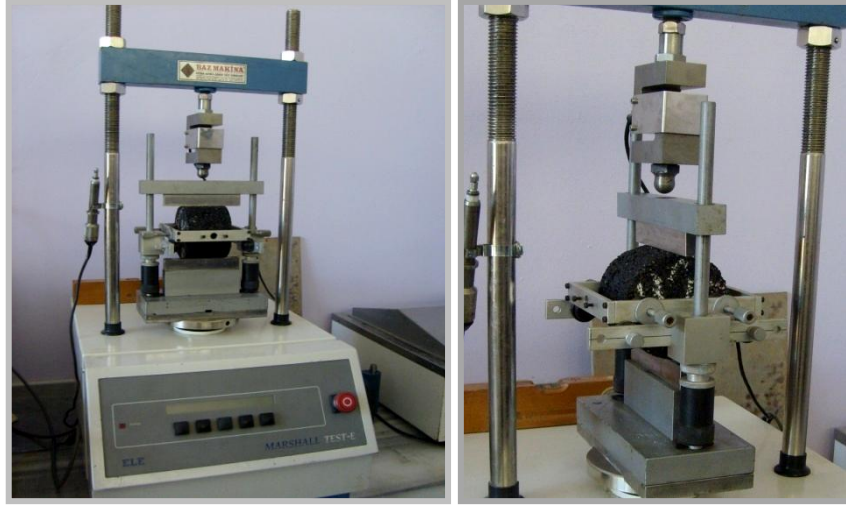
S' : Doygunluk derecesi (%)

I : Hava boşluğu hacmi (cm³)

V_a : Hava boşluğu yüzdesi

V : Numune hacmi (cm³)

Vakum işleminden sonra numuneler plastik film (streç film) ile kaplanmakta ve ağzı kapanabilen ve uygun hacimdeki plastik torbalara (buzdolabı poşeti gibi) konularak torbanın içine 10 ml su konularak torbanın ağzı kapatılmaktadır. Standarda göre numunelerin öncelikle -18°C sıcaklıkta 16 saat ardından 60°C suda 24 saat bekletilmesi gerekmektedir. Bu sürenin ardından numuneler poşet ve plastik filmden çıkarılmaktadır. Hem koşullandırılmış hem de koşullandırılmamış numuneler 25°C'deki suda 2 saat bekletilmekte ve 50 ± 2 mm/dakika hızla çapsal düzlemde yükleme yapılarak kırılmaktadır (Şekil 2.15).



Şekil 2.15. Çekme dayanımı deney düzeneği

Deneyden elde edilen maksimum yük değerleri kullanılarak çekme dayanımı değerleri formül 2.14 yardımıyla hesaplanır. Formülde TS çekme dayanımı (kPa), P_{mak} kırılmaya neden olan maksimum yük (kN), t ortalama numune yüksekliği (m), d numune çapını (m) ifade etmektedir. Çekme dayanımı oranı (TSR) ise koşullandırılmış numunelerin çekme dayanımı değerlerinin ($TS_{yaş}$) koşullandırılmamış numunelerin çekme dayanımı değerlerine (TS_{kuru}) oranlanması ile belirlenmektedir (Formül 2.15). Superpave şartnamesine göre bu değer minimum %80 olması istenmektedir.

$$TS = \left(\frac{2P_{mak}}{\pi \cdot d \cdot t} \right) \quad (2.14)$$

$$TSR = \left(\frac{TS_{yaş}}{TS_{kuru}} \right) * 100 \quad (2.15)$$

2.3.3.3. İndirekt Çekme Rijitlik Modülü Deneyi (BS DD 213)

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

BSK'ların rijitlik modülünün deneysel olarak belirlenmesinde, direk basınç, indirekt çekme, burulma deneyleri uygulanmaktadır. Bütün deney metotları, viskoelastik bir malzemenin kısa süreli yüklemelerde elastik davrandığı kabulüne dayanmaktadır. Deney

yöntemleri periyodik olarak uygulanan yükü ve bu esnada oluşan ani deformasyonları içermektedir. Rijitlik modülü uygulanan gerilme ve geri dönen birim şekil değiştirme ile hesaplanmaktadır. Rijitlik modülü esasında viskoelastik malzemenin ani elastik modülüdür. Diametral deneyler, direk basınç deneylerine göre karışımdaki bağlayıcının etkisine karşı daha hassas olduğundan daha yaygın olarak kullanılmaktadır. Direk basınç deneyindeki asfalt karışımlarında agregalar arasındaki kenetlenme ve bağlayıcının rijitliği söz konusu olurken, çekme deneyinde agrega kenetlenmesi daha az öneme sahiptir.

Bu deney BS DD 213 standardı ile tanımlanmış hasarsız bir deney olup rijitlik modülü (S_m , MPa) formül 2.16 ile hesaplanmaktadır.

$$S_m = \frac{F(R + 0,27)}{LH} \quad (2.16)$$

Bu formülde; F , maksimum dikey yük (N); H , 5 yük tekrarı sonucunda oluşan ortalama yatay deformasyon (mm); L , ortalama numune kalınlığı (mm); R ise poisson oranıdır (0,35). Deneyde Şekil 2.16'daki test düzeneği kullanılmıştır.



Şekil 2.16. İndirekt çekme rijitlik modülü deney düzeneği

2.3.3.4. İndirekt Çekme Yorulma Deneyi (TS EN 12697-24)

Yorulma davranışı, BSK'ların üst yapı performansında önemli bir parametredir. BSK'ların sıkışması, asfalt içeriği ve hava boşluğu gibi özelliklerin etkinlik dereceleri diğer deneylere göre, yorulma davranışının incelenmesi ile daha açık bir şekilde belirlenebilmektedir. Kök ve arkadaşları %5 asfalt % 5 hava boşluğunda imal edilmiş bitümlü sıcak karışımlarda hava boşluğunun %1 artması yorulma ömrünü %30, asfalt içeriğinin ise hedeflenen değerden %1 az olmasının yorulma ömrünü %12 azalttığı belirtilmiştir (Kök ve diğ., 2010).

Bitümlü sıcak kaplamaları oluşturan karışımdaki bitümlü malzemeler, her taşıt geçişinde kısa süreli bir yüke maruz kaldıklarından malzemenin rijitliğinin azalmasıyla çok küçük hasarlara neden olurlar. Bu hasarların birikmesi ile uzun sürede malzeme bozulmaktadır. Yorulma dayanımı, asfalt betonunun tekrarlı trafik yüklerine, dolayısıyla tekrarlı eğilme yüklemesine kırılmadan karşı koyabilme yeteneğidir. Yorulma, genel olarak asfalt betonu kullanılan üstyapılarda tekrarlı yükleme ile ilerleyen bir çatlak formudur. Yorulma çatlağı trafik yüklerinin belirli bir tekerrür sayısından sonra yavaş yavaş meydana gelmektedir. İnce kaplama veya zayıf alt tabakalar olması halinde ağır trafik yükleri altında aşırı defleksiyonlar oluşur. Bu defleksiyonlar kaplama altındaki yanal çekme gerilmelerini artırarak yorulma çatlaklarını doğurmaktadır.

Yorulma karakteristikleri genel olarak başlangıç gerilmesi veya birim şekil değiştirmesi ile bozulmaya neden olan yükleme adedi arasındaki ilişki olarak açıklanabilir. BSK'ların yorulma karakteristikleri genellikle gerilme veya şekil değiştirme kontrollü olmak üzere, tekrarlı eğilme kirişi, direkt çekme ve diametral deneylerle belirlenmektedir. BSK'ların yorulma davranışı logaritmik eksenlerde gerilme veya şekil değiştirmenin bozulmaya neden olan yük tekrarı sayısı arasındaki eğim olarak karakterize edilebilmekte ve bu ilişki formül 2.17'deki gibi tanımlanabilmektedir.

$$N_f = a \cdot \left(\frac{1}{\epsilon_o} \right)^b \cdot \left(\frac{1}{S_o} \right)^c \quad (2.17)$$

Bu formülde; N_f , yorulma ömrü (yük tekrar sayısı), ϵ_o , başlangıç şekil değiştirmesi, S_o karışımın başlangıç rijitliği, a, b, c , deneysel olarak belirlenen katsayılarıdır. Gerilme kontrollü deneyde gerilme sabit kalmakta şekil değiştirme yük tekrarı ile artmaktadır. Şekil

değiştirme kontrollü deneyde şekil değiştirme sabit kalmakta gerilme ise azalmaktadır. Gerilme kontrollü deneyde bozulma, numunenin kırılması olarak tarif edilirken, şekil değiştirme kontrollü deneylerde bozulma, rijitlikte %50 azalmanın olması olarak tarif edilir. Yorulma çatlak, çatlak başlaması ve çatlak ilerlemesi olarak iki aşamada değerlendirilir. Deneyde Şekil 2.17'deki test düzeneği kullanılmıştır.



Şekil 2.17. İndirekt çekme tekrarlı yorulma deney düzeneği

2.3.3.5. Dinamik Sünme Deneyi

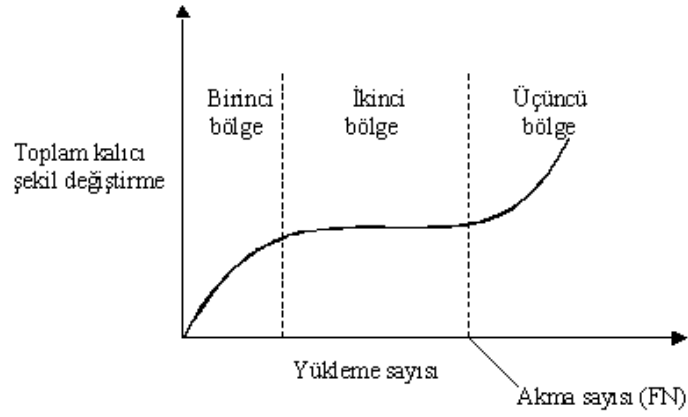
Dinamik sünme deneyinde sabit bir değerdeki yük, silindirik numunenin yatay yüzüne belirli periyot ile tekrarlı olarak uygulanmaktadır. Dinamik sünme deneyinde yük tekrar sayısının bir fonksiyonu olarak ölçülen toplam kalıcı deformasyon, tekerlek izi potansiyeli ile ilişkilendirilebilmektedir. Deney, farklı sıcaklık ve yüklemelerde yapılabilmektedir. Bu deney ile ayrıca belli bir poisson oranı kabul ederek ve yatay deformasyonun ölçülmesi ile rezilans modülü de tespit edilebilmektedir. Dinamik sünme deneyinde genellikle yük tekrar sayısı ve toplam kalıcı şekil değiştirme eğrisi (Şekil 2.18) sonuç olarak verilmektedir. Burada akma sayısı üçüncü bölgenin başladığı yük tekrar sayısı olarak tekerlek izi potansiyeli ile ilişkilendirilmektedir. Yapılan çalışmada beş deney arasından dinamik sünme deneyinin arazide ölçülen tekerlek izi derinliği ile çok iyi korelasyon verdiği belirtilmiştir (Kaloush ve Witczak, 2002). Şekil 2.19'de yük zaman ve yük deformasyon arasındaki ilişki görülmektedir.

Dinamik sünme deneyinde toplam eksenel birim şekil değiştirme ($\mu\epsilon$) ve sünme rijitliği E_c , formül 2.18 ve 2.19 ile hesaplanmaktadır (ELE, 1994).

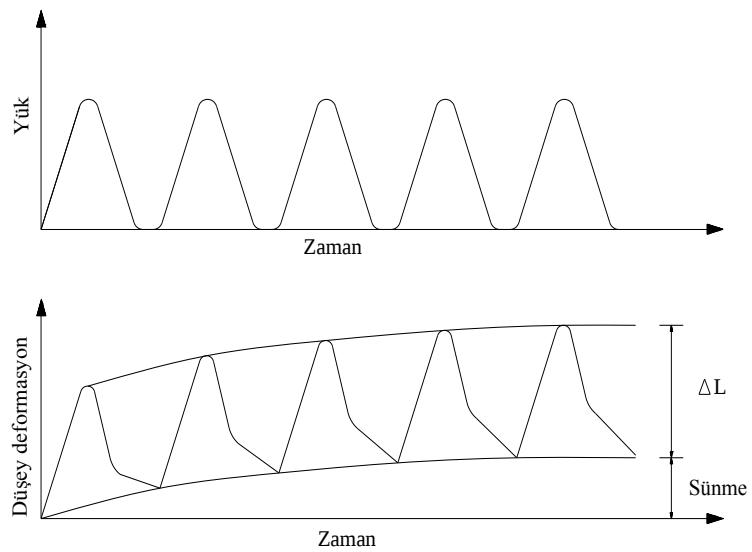
$$\epsilon_c = (L3_n - L1) / G \quad (2.18)$$

$$E_c = \sigma / \epsilon_c \quad (2.19)$$

Burada $L3_n$, n darbe sayısındaki deplasman (mm), $L1$, başlangıç referans deplasmanı (mm), G , numunenin başlangıç yüksekliği (mm), σ , maksimum düşey gerilmedir (kPa). Deneyde Şekil 2.20'deki test düzeneğine sahip UTM cihazı kullanılmıştır.



Şekil 2.18. Yük tekrar sayısı-şekil değiştirme ilişkisi



Şekil 2.19. Yük-zaman ve deformasyon-zaman ilişkisi



Şekil 2.20. Dinamik sünme deney düzeneği

2.4. Bitümlü Sıcak Karışımlarda Aranılan Özellikler

Yoğun gradasyona sahip bir asfalt kaplama karışımının, istenilen performansı hizmet ömrü süresince sağlayabilmesi amacıyla uygun bir şekilde tasarım yapılabilmesi için karışımların:

- Stabilité,
- Rijitlik,
- Dayanıklılık,
- Yorulma Direnci,
- Esneklik (Fleksibilite),
- Kayma Direnci,
- Geçirgenlik (Permeabilite),
- İşlenebilirlik, özelliklerine dikkat edilmelidir.

Bu fiziksel ve mekanik özelliklerin hepsini birden ideal olarak sağlayabilecek bitümlü sıcak karışım elde etmek mevcut şartlarla elde edilemeyebilir. Ancak en ideal şartları sağlayan karışım elde edilebilmek için bu özelliklerin iyi bilinmesi gerekir (Tunç, 2001, Tunç, 2004, Asfalt El Kitabı, 2002).

2.4.1. Bitümlü Sıcak Karışımların Stabilitesi

Bitümlü sıcak karışımların stabilitesi, taşıtlardan kaplama tabakasına gelen dinamik yükler, uzun süreli statik yükler ile hızlanan veya yavaşlayan tekerlek etkileri altında oluşan basınç, çekme, kesme kuvveti (makaslama) ve sökülmeye karşı bitümlü kaplamanın gösterdiği dirençtir (Umar, Ağar,1991). Asfalt kaplama karışımının, etkiyen yüklerden dolayı bünyesinde meydana gelebilecek deformasyonlara karşı koyma yeteneğidir. Stabilitate yetersizliği olan kaplamalarda çökme, tekerlek izi ve ondülasyon gibi bozulmalar meydana gelir. Ancak, düşük stabilite kadar çok yüksek stabiliteye sahip kaplamalar da yük altında esnek davranış göstermeyerek çatlayacaklarından istenmezler. Kaplamanın stabilitesi, sıcak karışımın içsel sürtünme direncine ve kohezyonuna bağlıdır. Sıcak asfalt karışımların stabilitesine etki eden hususlar karışımın kayma mukavemeti, ısı ve karışımdaki danelerin yer değiştirmeye karşı direnci olan eylemsizlik (atalet) direnci olarak göz önüne alınır (Geçkil, 2008). Sıcak asfalt karışımların kayma mukavemeti (τ), formül 2.20 ile tanımlanır (Tunç, 2004).

$$\tau = c + \sigma \cdot \tan \theta \quad (2.20)$$

Bu formülde;

- (θ) agrega daneleri arasındaki içsel sürtünme açısı,
- (c) kohezyon olup agrega ile asfalt arasındaki bağ (adezyon) kuvveti,
- (σ) normal gerilmedir.

İçsel sürtünme açısı agreganın yüzey dokusuna, gradasyonuna, dane şekline, karışımın yoğunluğuna ve asfalt miktarı ile tipine bağlıdır. Kohezyonu etkileyen parametreler, yükleme hızı, yüklenen alan ve sıcaklıkla ters orantılı olan asfalt viskozitesinin etkisidir. Ayrıca agreganın geçirgenliği, karışımın asfalt yüzdesi, asfaltın viskozluğu ve ısısı, yükleme hızı ve filler/asfalt oranı önemli etki yapmaktadır. Sıcak asfalt karışımların;

- Agreganın yüzey pürüzlülüğü, köşeli yapısı ve yoğunluğu arttıkça,
- Karışımın boşluk oranı azaldıkça,
- Karışımın yoğunluğu arttıkça,
- Karışımın serme-sıkıştırma ısısı arttıkça,
- Asfaltın viskozitesi arttıkça veya katılaştıkça,
- Yükleme hızı arttıkça ve ısı azaldıkça,
- Asfalt kaplama tabakası kalınlığı arttıkça,

stabilitesi de önemli bir oranda artmaktadır (Tunç, 2001, Tunç, 2004, Asfalt El Kitabı, 2002). Bitümlü karışımların stabilitesi, kalıcı deformasyonlara karşı gösterdiği direnç olarak tanımlandığından kalıcı deformasyonların tespit edilmesi gerekmektedir. Karışımın yüksek ısılarda veya uzun süreli gerilmeleri göz önüne alınmalıdır. Kaplama tabakasını oluşturan aşınma, binder, bitümlü temel tabakalarını ayırarak deformasyonlar hesaplanmalı ve toplam deformasyon miktarı göz önüne alınması gerekmektedir.

2.4.2. Bitümlü Sıcak Karışımların Rijitliği

Bitüm termoplastik ve viskoelastik bir malzeme olduğundan düşük sıcaklıklarda, özellikle kısa süreli yüklemelerde, elastik özellik gösterirken yüklemenin uzun süreli olduğu durumlarda viskoz davranış gösterir. Termoplastik malzemeler ise yüksek sıcaklıklarda düşük mukavemet, düşük sıcaklıklarda ise yüksek mukavemet gösterirler. Bitümün bu özellikleri bitümlü karışımlara da yansıdığı için BSK’larda da bir takım bozulmalar meydana gelir (Sayın ve Tanyıldızı, 2006).

Bitümlü sıcak karışımların mekanik özelliklerini belirlemek için “Rijitlik Modülü” kullanılmaktadır. Rijitlik modülü, elastik malzemelerin elastikiyet modülüne benzetmekle beraber ısı ve yükleme hızına bağlı olarak değişkenlik göstermektedir.

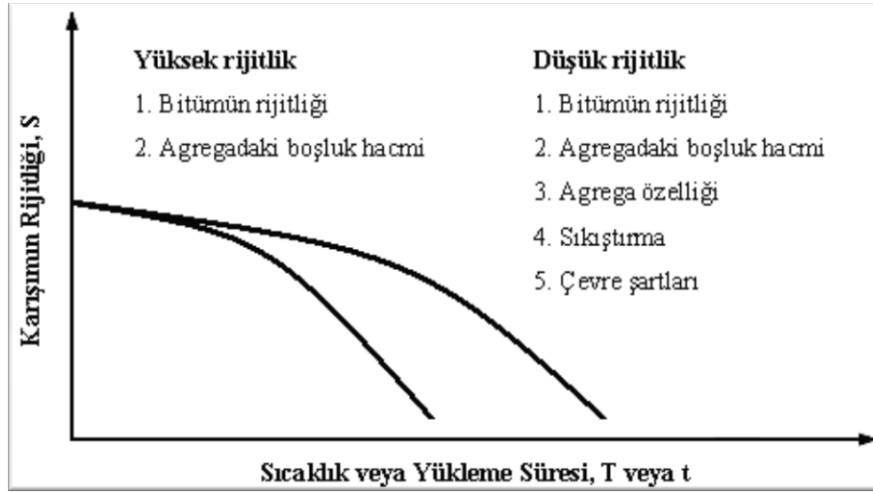
Rijitlik, bitümlü sıcak karışımların yükleme süresi veya hızı ve ısı etkisi altında gerilme ve deformasyon arasındaki ilişkinin ifadesidir. Yani rijitlik genel olarak;

- Yükleme süresi azaldıkça veya yükleme hızı arttıkça,
- Isı azaldıkça,
- Karışımın yoğunluğu arttıkça,
- Asfaltın viskozitesi arttıkça (penetrasyonu azaldıkça), artacaktır (Tunç, 2001).

Bitümlü sıcak karışımların rijitliği; aşağıdaki test metotları ile saptanır.

- Sünme testi,
- Serbest basınç veya çekme testi,
- Dinamik modülü testi,
- İndirekt (Yarılma) çekme testi.

Bitümlü sıcak karışımın rijitliğinin sıcaklık veya yükleme süresi ile değişimi ve rijitliği etkileyen faktörler Şekil 2.21’de görülmektedir.



Şekil 2.21. Sıcaklık veya yükleme süresinin bir fonksiyonu olarak karışım rijitliği (Shell, 2004).

2.4.3. Bitümlü Sıcak Karışımların Dayanıklılığı (Durabilitesi)

Bir asfalt kaplama karışımının, trafiğin aşındırıcı etkilerine ve hava, su, sıcaklık gibi çevresel şartlara karşı koyma yeteneğini yani gösteren bir özelliktir. Ayrıca asfalt bünyesindeki oksidasyon ve buharlaşma gibi değişiklikler ile suyun donma çözülme etkisi dolayısıyla kaplama ve agregada üzerinde meydana gelen değişiklikler ve asfaltın yaşlanması, sertleşmesi, agreganın kırılması, ufalanması ve asfaltın soyulması da eklenebilir. Asfalt karışımının dayanıklılık özelliği aşağıdaki şartların sağlanmasıyla artırılabilir.

- Yüksek asfalt içeriği,
- Yüksek soyulma direnci,
- Yoğun veya iyi derecelenmiş agregada gradasyonu,
- Karışımın düşük boşluk oranı ve permeabilitesi (iyi sıkıştırma),
- Sert asfalt (düşük penetrasyonlu) ve film tabakası.

Bu şartlar sağlandığında karışımın geçirimsizliği artması sebebiyle karışım bünyesine fazla su ve hava girmesi önlenmiş olacağından dayanıklılığı artacaktır. Karışımındaki asfalt miktarının artırılması ile agregada danelerini saran ince film tabakası kalınlaşacak ve daha kalın asfalt filmler yaşlanmaya (sertleşmeye) karşı direncin artmasını sağlayacak ayrıca boşluk miktarını azaltacaktır. Ancak, daha kalın asfalt filmi tekerlek izi, deformasyon ve sıcak havalarda kusma oluşumuna yatkın olduğuna dikkat edilmelidir.

Su etkisine karşı koymak için de aynı koşullar yanında daha yoğun bir karışım kullanmak, asfaltın agregadan soyulmasına karşı daha yüksek dirence sahip olacaktır. Karışımında yetersiz oranda asfalt kullanmak, trafiğin aşındırma etkisi ile agreganın yüzeyden kopmasına sebep olacaktır. Ayrıca, sıcak karıştırma işleminde asfaltın aşırı derecede ısıtılması durumunda, yaşlanmanın etkisiyle ileriki aşamalarda asfaltın kırılgan olmasının sonucu olarak ayrışmalar ortaya çıkacaktır. Karışımın aşınması doğal olarak agreganın aşınma özelliğine de bağlı olduğundan sıcak karışımında kullanılan agreganın kırılmış, elenmiş şartı yanında, aşınmaya, soyulmaya ve ufalanmaya karşı da dirençli olması istenir (Geçkil, 2008; Tunç, 2001; Asfalt El Kitabı, 2002).

2.4.4. Bitümlü Sıcak Karışımların Yorulma Mukavemeti

Yorulma mukavemeti, bitümlü sıcak kaplamada tekrarlan yüklerin etkisiyle ortaya çıkan gerilmelere karşı, kalıcı olmayan deformasyonların oluşmasına müsaade edilebilen mukavemet değeridir. Kaplama çekme mukavemeti etkisi altındaki gerilmelere karşı esneyerek, kaplamada çatlamalar oluşmaması için gösterdiği dirençtir. Bu konuda yapılan çalışmalar yorulma mukavemetinin arttırılabileceğini göstermiştir. Yorulma mukavemeti:

- Rijitliğin artması,
- Asfalt penetrasyonunun artması
- Gradasyon ve yoğunluğun artması,
- Kaplama kalınlığının artması,
- Asfalt miktarının artması,
- Eğilme gerilmesinin artışı, ile arttırılabilmektedir.

Ayrıca yapılan deneyler, yoğun gradasyonlu asfalt karışımların, açık gradasyonlu karışımlara göre daha yüksek yorulma mukavemetine sahip olduklarını göstermiştir. Karışım içine, sıkıştırılmış bir kaplamada kusmaya sebep olmaksızın daha yüksek asfalt içeriğine izin veren iyi derecelenmiş agregalar katılmalıdır (Geçkil, 2008; Tunç, 2001; Asfalt El Kitabı, 2002; Shell Bitüm El Kitabı, 2004).

Bir kaplamanın yorulma ömrü, 2.21 bağıntısı ile ifade edilmektedir.

$$N_f = K(1/\epsilon)^n \quad (2.21)$$

N_f : Yorulma çatlağı meydana gelmesi için gereken tekrarlı yük uygulama sayısı (yorulma ömrü)

ϵ : Uygulanan şekil değiştirmenin maksimum değeri,

K ve n: Bitümlü karışımın özelliklerine ve kompozisyonuna bağlı katsayılar.

Yorulma ömrü, genel olarak karışımın boşluğu azaldıkça, rijitliği ve kaplama kalınlığı arttıkça ve asfalt miktarı ve yumuşaklığı arttıkça artış göstermektedir.

2.4.5. Bitümlü Sıcak Karışımların Esnekliği (Fleksibilitesi)

Esneklik, temel ve alttemel tabakalarının trafik ve çevre etkileriyle, uzun süreli oturma yapması durumunda bitümlü sıcak karışım kaplamaların, çatlama olmadan hafifçe eğilebilme ve oluşan çökmelere uyabilme yeteneğini olarak ifade edilmektedir. Asfalt kaplama karışımının esnekliği, yüksek asfalt içeriği ve nispeten açık gradasyonlu veya boşluklu agregalar ile artırılabilir. Ancak, kaplamanın esnekliğinin artması durumunda stabilitesinin azalacağı dikkate alınmalıdır. Kaplama tabakasının esnekliğinin yeterli seviyede olması halinde çatlamlar olmadan sadece geçici deformasyon oluşur.

2.4.6. Bitümlü Sıcak Karışımların Geçirgenliği (Permeabilitesi)

Bitümlü sıcak karışımlardan oluşturulan kaplama tabakasının altındaki diğer tabakalara suyun geçişine izin vermeyecek şekilde dizayn edilmesi gerekmektedir. Geçirgenlik, kaplamanın içinden hava ve su geçişine karşı gösterdiği direnci ifade etmektedir. Kaplamadaki boşluk miktarı ile boşlukların birbiri ile bağlantısı, kaplama yüzeyindeki su, hava ve gazların geçmesi için gerekli koridorları oluşturur. Kaplamadaki geçirimsizliğin artması ile bünyesine giren hava ve su etkisiyle asfaltın yaşlanması hızlanır, soyulma mukavemeti azalır ve donma-çözülme olayının tekrar etmesi ile de kaplamada bozulmalar oluşur. Bir kaplamanın;

- Karışımın asfalt miktarı,
- Agregada gradasyonu ve yoğunluğu,
- Sıkıştırma durumu, arttıkça boşluk oranı azalacağından hatta tamamen boşluksuz bir tabaka elde edilebileceğinden geçirimsizliği azalacaktır.

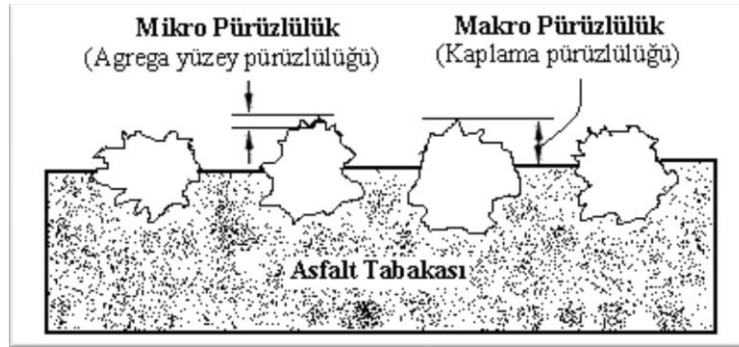
Ancak, kaplamadaki stabilite sağlanabilmesi için, sıcak havalarda kuma ve trafik altında sıkışmaya müsaade etmek amacıyla %12-14 arasında boşluk bırakmak gereklidir. Agregada taneleri arasındaki boşlukların belli oranlarda bitümle dolması gerekmektedir. Ayrıca, karışımın içsel sürtünme açısının azalmasını önlemek, asfaltın sertleşmesini önlemek, asfaltın genişmeden ötürü terleme ve kuma ile kaplama yüzeyine çıkmasını

önlemek ve kaplamanın geçirgenliğini azaltarak asfaltın yaşlanmasını geciktirmek için boşluk miktarı sınırlandırılmaktadır.

2.4.7. Bitümlü Sıcak Karışımların Kayma Direnci

Kayma direnci, asfalt kaplama yüzeyinde hareket eden araçların fren yapmaları durumunda sırasında güvenli olarak durabilmesi ve kurplarda merkezkaç kuvvetinden dolayı savrulmaması için teker ile kaplama arasındaki gerekli sürtünme direncidir.

Kayma direnci kaplamanın yüzey dokusu kadar karışımdaki asfalt oranı ve boşluk oranı ile ilgilidir. Düşük asfalt miktarı, cırlanma direnci yüksek, kırmataş ve pürüzlü yüzeyli agregalar ile açık ve kaba gradasyonlu karışım kullanılmasıyla kayma direnci artmaktadır. Kaplamanın yüzey pürüzlülüğü azaldıkça sürüş konforu artar ancak, buna karşılık kayma direnci önemli boyutta azalmaktadır. Şekil 2.22’de görüldüğü üzere asfalt kaplamaların kayma direnci makro ve mikro pürüzlülüğüne bağlıdır. Mikro pürüzlülük agreganın yüzey yapısına bağlı iken makro pürüzlülük asfalt karışımında kullanılan agreganın nominal boyutu ile ilgilidir (Tunç, 2004).



Şekil 2.22. Kaplama pürüzlülüğü (Tunç, 2004).

2.4.8. Bitümlü Sıcak Karışımların İşlenebilirliği

İşlenebilirlik, kaplamayı teşkil eden malzemelerin istenilen kıvamda ve uniformlukta serilmesi ve sıkıştırılması esnasında gösterdiği kolaylığın ölçüsü olarak tanımlanır. İşlenebilirlik, agregaların gradasyonu, danelerin şekli ve yüzey dokusu ve asfalt oranı ile doğrudan ilişkilidir. Bitümlü sıcak karışımların işlenebilirliği düşük olduğunda serme ve sıkıştırmada birçok zorluklar doğuracaklarından, genellikle stabilitesi düşük ve homojen olmayan olan kaplamalar elde edilmektedir.

İşlenebilirlik, karışım dizayn parametrelerinde, agrega kökeni veya gradasyonunda yapılacak değişikliklerle yükseltilebilir (Kurtis, 2003). İşlenebilirlik genel olarak; aşağıda belirtilen özellik değişiklikleri ile azaltılabilmektedir.

- Agreganın maksimum dane boyutunu ve kaba agrega miktarını arttırmak,
- Agrega yüzeyinin pürüzlülüğünü arttırmak,
- Kırmataş agrega kullanmak,
- Karışımın ısısı düşürmek,
- Asfaltın penetrasyonunu düşürmek veya viskozluğunu arttırmak,
- Ara boyutlu malzeme miktarını ve mineral filler miktarını aşırı arttırmak (Tunç, 2004).

2.5. Esnek Yol Üstyapılarında Karşılaşılan Bozulmalar

Esnek yol üstyapıları yeni inşa edildikten sonra trafik yükleri ve iklim koşulları nedeniyle zamanla bozulurlar. Bu bozulmalar, başlangıçta çok yavaş olduğu için yolun servis seviyesini koruyabilmek için sadece periyodik bakıma ihtiyaç gösterirler. Süre ilerleyip zamanında bakım ve iyileştirme yapılmazsa, bozulmalar artarak çok pahalı bakım ve iyileştirme seçeneklerine gereksinim gösterirler. Bu nedenle bozulmaya başlamış yollarda, zamanında yapılmış bakım programları, en fazla kazancı sağlar (Güzel, 2001).

Yapılacak bakım programları, üstyapının sağlıklı değerlendirilmesi ile başlar. Bu amaçla bozulmaya yüz tutan yolların yapısal dayanımının, yüzey bozukluklarının ve üstyapı tabakalarının fiziksel özelliklerinin belirlenmesi gerekir. Genellikle etütler sonucunda toplanan verilerle analizler yapılır ve üstyapı takviye kalınlıkları belirlenir. Genel olarak, esnek üstyapılardaki bozuklukların gruplandırılması şu şekildedir;

- a) Şekil yönünden bozulmalar, oturmalar, bombelikler,
- b) Çatlaklar,
- c) Ayrışma, sökülme ve soyulmalardır.

Üstyapı bozulması, bir üstyapının tasarım süresi sonunda trafik yükleri ve çevresel etkiler sonucunda düşmesi beklenen hizmet yeteneğinin bir derecesidir. Üstyapı bozulmalarında, öncelikle bozulma nedenlerinin araştırılması gerekir. Bunun içinde iyi bir yol değerlendirme çalışması dahilinde karayolu ağının durumu ve yol bozulmalarının iyi incelenmesi şarttır. Bozulmaya neden olan etkenler tespit edilip, yok edildikten sonra

yapılacak bakım ve onarım çalışmaları sayesinde, ileride tekrarlanabilecek olan bozulmalar da önlenmiş olacaktır.

Türkiye şartlarında, tasarım metodunun ve malzemenin yanlış seçimi, trafiğin öngörülenden hızlı artışı, iklimsel şartlarının ağırlığı, yol bakımı sırasındaki projeye ve tekniğe uygun oluşturmayan yapımlar, bakım biriminin daha az etkin çalışması ve diğer birimler ile koordinasyon eksiklikleri, başlıca bozulma nedenleridir.

Bir yolun hizmet ömrünü uzatmanın veya ekonomik ömrü içerisinde ondan ekonomik bir şekilde faydalanmanın tek çözümü, gerekli düzeyde devamlı bakım yaparken, yol üstyapısının dayanımını gerekirse onarım çabalarıyla yükseltmektir. Yol bozulmalarının giderilmesi, ancak bozulma nedenlerinin iyice anlaşılmasına bağlıdır. Aksi takdirde, nedeni anlaşılmayan veya yanlış anlaşılan bozuklukların bakım ve onarım hizmetleri, mevcut aksaklıkları gidermekten uzak kalacaktır. Yol sonsuz uzunlukta bir yapı olduğuna göre, yol boyunca bozulmaya etki eden faktörler devamlı değişim göstermekte, şartnamesine uygun inşa edilse de mevcut zemin yapısı, nem oranı, iklim, trafik miktarları, farklı dingil yükleri gibi faktörler yolu etkilemektedir. Böylece, sayısız aksaklıklar yüzeyde kendini gösterirken, kullanıcıları tarafından bu bozukluklar gözlenmekte ve kullanıcılar bunların giderilmesi konusunda kamuoyu ile baskı unsuru oluşturmaktadır.

Genel olarak, yol üstyapısında meydana gelen bozulmalar, fonksiyonel bozulma ve yapısal bozulma olmak üzere iki türlü olarak tanımlanır. Fonksiyonel bozulmada, üstyapı için amaçlanan fonksiyonlar yavaş yavaş yerine getirilemez. Yapısal bozulma ise, üstyapı bileşenlerinin bir veya birkaçının kırılmasını, göçmesini veya bozulmasını belirtir (Doğan, 2006).

2.5.1. Bozulmaya Yol Açan Etkenler

Yol esnek üstyapısında, çeşitli nedenlerle meydana gelen bozulmaların etkenleri, aşağıda ana başlıklar altında sınıflandırılıp belirtilmiştir. Bunlar genelde tasarım hataları, yapım hataları, bakım hataları, çevre şartları, iklim şartları ve trafik etkilerinden kaynaklanmaktadır.

2.5.1.1. Tasarım Hataları

Tasarım hataları, taban zemini etütlerinin yeterince sağlıklı yapılmaması, büyük boyutlu yarma ve dolguların oluşturulması, şevlerin dik kesilmesi, hendeklerin ve sanat yapılarının uygun yer ve boyutta yapılmaması, büz ve menfez üstlerinde yeterli dolgu boyu bırakılmaması, üstyapı projelendirilmesinde trafik ve çevresel etkilerde yapılan yanlış hesaplamalar sonucu meydana gelen bozulmalardır (Güzel, 2001).

2.5.1.2. Yapım Hataları

Taşıma gücü zayıf zemin iyileştirilmeden yol gövdesinin oluşturulması, uygun dolgu malzemesi seçilmemesi, drenaj sisteminin yetersiz olması, asfalt tabaka kalınlıklarının şartnameye göre yapılmaması, kaplama malzemesi olarak kullanılan agrega ve bitümlü malzemenin yanlış seçimi ve kalite eksiklikleri, yetersiz yâda aşırı sıkıştırma, düşük hava sıcaklığında veya yağışlı havada bitümlü karışım imalatı, kalitesiz işçilik, yapım hataları olarak sayılabilir. Üstyapı tabakalarında oluşabilecek bozulmaların sebepleri; yukarıda belirtildiği gibi kötü malzeme kullanımı, sıkıştırmanın uygun şekilde yapılmaması, yapım sırasında hava sıcaklığının istenilen düzeyde olmaması olarak sayılabilir. Yüzeysel kaplamada ya da asfalt betonu kaplamada kullanılacak agreganın temiz, sağlam ve şartnameye uygun granülometriye sahip olması gerekir. İyi seçilmemiş veya kontrol edilmemiş granülometrilili, çürük, kirli, çabuk cilalanan ve yüksek oranda yuvarlak agrega içeren malzemeler kullanılmamalıdır. Bitümlü bağlayıcı gerekli oranlarda kullanılmalı, gerekenden az ya da fazla kullanılmamalıdır. Asfalt betonu kaplamalar için filler yüzdesinin yetersiz ya da fazla olmamasına, yetersiz karıştırma yapılmamasına dikkat edilmelidir. Ayrıca, aşırı derece veya yetersiz sıkıştırma, astar veya yapıştırma tabakalarının gerekli özenle yapılmaması, asfalt betonu kaplamalar içinde serme ve sıkıştırma sıcaklıklarının düşük olması, yapım sırasında karışımın ayrışmaya uğraması, genel yapım hataları olarak sınıflandırılabilir (Güzel, 2001).

2.5.1.3. Bakım Hataları

Yol gövdesi, kaplama, sanat yapıları, drenaj ve diğer tesisleri zaman içerisinde işlevini yitirmeye başlar başlamaz, bunların bakım ve onarımlarındaki, gecikmeler

yüzünden oluşan hatalar ve uygun yapılmayan kar ve buz mücadeleleridir. Karayolları kenarlarında bulunan banketlerin bakımı, trafik emniyeti ve üstyapının ömrü yönünden önem arz eder. Bu bakımdan banketlerin daima düzgün ve sert bir yüzey olarak korunması gerekir. Banket bakımının ihmal edildiği yollarda, kaplama ile banket yüzey sularının dış ortama akmayışı nedeniyle birbirinden ayrılır ve kaplama kenardan ortaya doğru süratle bozulmaya başlar. Bütün drenaj sistemleri, hendek ve kanallar, sanat yapıları sürekli kontrol edilmeli, eğer kanallar, drenaj boruları veya menfezler çeşitli sürüntü maddeleriyle tıkanmış ise temizlenmelidir. Kışın meydana gelen kar yağışı ve buzlanma, trafiğin güvenli ve hızlı seyretmesini engeller. Bu nedenle, yapılan bakım işlemlerindeki yanlış eylemler kaplamaya zarar verebilmektedir. Kar ve buz ile mücadelede tuz gereğinden fazla uygulanırsa, kaplamanın bozulmasına neden olabilirler (Güzel, 2001).

2.5.1.4. Çevre ve İklim Şartları

Bitümlü bağlayıcıların viskoziteleri sıcaklığa doğrudan bağlıdır. Kışın agreganın bağlayıcıya yapışabilmesini sağlamak için, çok düşük viskoziteli bağlayıcı kullanıldığında, ilkbaharda sıcaklık yükselince, yumuşama sonucu üstyapının bozulması kaçınılmaz olacaktır. Don etkisi olan bölgelerde, yol üstyapısının davranışı don penetrasyon derinliği ile yakından ilgilidir. Don penetrasyon derinliğinin tespiti için çeşitli teorik formül ve abakların yanı sıra arazi ve sıcaklık ölçümleri de geniş bir şekilde kullanılır. Yağış mevsimlerinde yağmur ve kar sularının drenaj sistemlerinin yardımıyla uzaklaştırılması gerekir. Taban zemininde bulunan kil ve silt gibi bazı malzemeler bünyelerine su aldıklarında, büyük hacim değişikliği gösterirler. Bu hacim değişikliği sonucu meydana gelen kabarmalar ise üstyapıda kırılma ve dağılmalara yol açar. Yağışlardan sonra oluşan yüzeysel sular, yol yüzeyi, banket, yarma ve dolgu şevlerinin erozyonuna sebep olurlar (Güzel, 2001).

2.5.1.5. Trafik Etkileri

Yapılan araştırmalar sonucunda, ülkemizde yukarıda bahsedilen tasarım, yapım, bakım hataları ve iklim şartlarının yanında, üstyapı bozulmasında en önemli etkenlerden bir diğeri, denetimsiz seyreden aşırı yüklü kamyonlar olduğu gözlenmiştir. O halde, konu sadece karayollarına yapılan harcamalar açısından ele alınırsa, hedefe yönelik en

stabilitesinin yetersiz olmasından da oluşabilmektedir. Yüksek sıcaklıklar asfaltın termoplastik özelliklerinden dolayı stabiliteyi düşürür. Yük tekrarı kalıcı deformasyonların artmasına neden olur (İlcalı ve diğ., 2001).

2.5.2.1. Oturmalar

Oturmalar, kaplama altındaki alt tabakalarda meydana gelen bozulmaların yüzeye yansımalarıdır. Bunlar 0.5–2 m yarıçaplı dairesel veya daireye yakın boyutta oluşur ve bitümlü tabakalar esneklikleri sayesinde genellikle çatlamadan alt tabakaların yeni kotuna intibak ederler ancak, kırılğan asfalt kaplamalarda çatlamalar görülür. Yerel oturmaların derecelendirilmesi hafif, orta ve şiddetli oturmalar olmak üzere üçe ayrılır. Hafif şiddette yerel oturmalarda, düşey yönlü deplasman 50 mm' den azdır. Sürüş konforundaki azalma çok az olup, hafif sarsıntılara neden olabilir. Orta şiddette yerel oturmalarda, düşey yönlü deplasman 50-100mm arasındadır. Hissedilir seviyede yükselme ve alçalmalar oluşmuştur. Bakım yöntemi olarak, drenaj sistemleri gözden geçirilmeli, bozuk kesim gerekirse kazılıp atılmalı, sıcak veya soğuk karışım malzemesi ile yamanmalıdır. Yüksek şiddette yerel oturmalarda, düşey yönlü deplasman 100 mm' nin üstündedir. Sürekli hale gelen yükselip alçalmalar, rahatsızlık verici seviyededir. Hız azaltma zorunluluğu hissedilir. Bakım yöntemi olarak, drenaj sistemleri gözden geçirilmeli, bozuk kesim gerekirse kazılıp atılmalı, sıcak ve ya soğuk karışım malzemesi ile yamanmalıdır. Gerekli görülürse, üstyapı tabanı ve dolgular iyileştirilmelidir (Asfalt ve Uyg., 2001; Kuloğlu, 2001; Balta, 2004; İsfalt, 2002). Yüksek şiddette lokal oturmalar Şekil 2.24'de görülmektedir.



Şekil 2.24. Yüksek şiddette lokal oturmalar (İsfalt, 2002).

Yerel oturmaların oluşma nedenleri;

- a) Taban, alt temel ve/veya temel tabakalarında yetersiz sıkıştırma,
- b) Üstyapı tabanının taşıma gücünün zayıf olması,
- c) Sanat yapılarının yaklaşım yerlerinin yetersizliği,
- d) Dolgu şevindeki eğim hataları ve yan desteklerin olmayışı (banketlerin yetersizliği),
- e) Uygun olmayan bakım teknikleri, yetersiz sıkıştırma ve yetersiz drenaj sistemidir.

Bu tip bozulmalar ancak alt tabakaların iyi projelendirilmesi ve şartnamelere uygun şekilde yapılması ile önlenabilir. Doğal zeminin zayıf olduğu durumlarda, bu kısmın sıkıştırılması veya stabilizasyonla giderilebilir.

2.5.2.2. Çökmeler ve Çukurlar

Çökmeler, yolun plan ve boy kesitine göre düşük kotta kalmış çatlakları içeren ya da içermeyen ve orijinal kaplama sathına göre alçakta kalmış, 0.5–1.5 m. dairesel çapta ve derinlikleri 2–5 cm. ya da daha fazla olabilen ve yağışlardan sonra içlerinde su biriken küçük çukurlardır.

Çökmeler zamanla genişleyerek, yolun zamanından önce elden çıkmasına da neden olabilirler. Oluşum nedenleri;

- a) Üstyapı kalınlıklarının yetersiz oluşu ve yetersiz olarak sıkıştırılması,
- b) Yetersiz drenaj nedeniyle suyun temel altında birikimi,
- c) Temel ve alttemel malzemelerinin kille karışması,
- d) Kaplamanın taşıyabileceğinden daha ağır trafik yükü ile karşılaşması.
- e) Yanlış yapım teknikleri ve düşük kalite kontrolü,
- f) Kaplamada düşük kaliteli agrega kullanımı,

Hafif şiddette çukurlarda, çukurun derinliği 5 cm' den ve çapı 10 cm' den azdır. Bakım için, çukur uygun bir şekilde düzeltilip soğuk veya sıcak karışım ile yamanmalıdır.

Orta şiddette çukurlarda, çukur derinliği $5 < H < 10$ cm ve çapı $10 < R < 30$ cm' dir.

Çukur uygun bir şekilde düzeltilip soğuk veya sıcak karışım ile yamanmalıdır. Geçici çözüm (bakım amaçlı) olarak, bozuk kesim bozukluk derinliğince kazılmalı, kazılan malzeme cinsinden aynı kalınlıkta malzeme getirilmelidir. Kalıcı çözüm olarak, üstyapı

etüdü sonucu belirlenen takviye tabakaları uygulanmalıdır. Orta şiddette çukur örneği Şekil 2.25’de görülmektedir.



Şekil 2.25. Orta şiddette çukur (İsfalt, 2002).

Yüksek şiddette çukurlarda, çukurların derinliği $H > 10$ cm ve çapı $R > 30$ cm' dir. Geçici çözüm (bakım amaçlı) olarak, bozuk kesim bozukluk derinliğince kazılmalı, kazılan malzeme cinsinden aynı kalınlıkta malzeme getirilmelidir. Kalıcı çözüm olarak, üstyapı etüdü sonucu belirlenen takviye tabakaları uygulanmalıdır (Asfalt ve Uyg., 2001; Yıldız, 2003; Sağlık ve Güngör, 2006). Yüksek şiddette çukur örneği Şekil 2.26’da görülmektedir.



Şekil 2.26. Yüksek şiddette çukur (İsfalt, 2002).

2.5.2.3. Tekerlek İzi ve Oluklanmalar

BSK'larda en sık görülen, gerek teknik ve gerekse ekonomik açıdan çok önemli kabul edilen bozulma tipidir. Tekerlek izi oluşumu, özellikle sıcak havalarda ve ağır taşıt trafiğinin yoğun olduğu yollarda çok sık karşılaşılan, kalıcı deformasyonun en yaygın şeklidir ve aşağıdaki nedenlerden kaynaklanmaktadır.

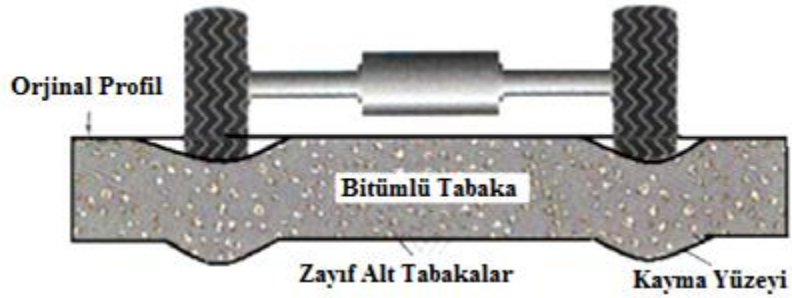
- a) Aşırı asfalt ve filler yüzdesi veya filler/bitüm yüzdesi,
- b) Karışımında yuvarlak dere malzeme kullanılması,
- c) Karışımın yetersiz sıkıştırma.
- d) Ağır trafik yükü ve tekerrür sayısının fazlalığı ve ağır taşıtların hızı,
- e) Yüksek hava sıcaklığı ve düşük viskoziteli asfalt,
- f) Yetersiz temel tabakası kalınlığı ve zemin mukavemeti,
- g) Alt tabakanın veya tabanın oturmaya maruz kalması,
- h) Doğal zeminin ve üst tabakaların yanal hareketi,
- i) Drenaj yetersizliği ve/veya yetersiz sıkışma nedeniyle üstyapı tabanının stabilitesini kaybetmesi, taşıma gücünün zayıflaması.

Bitümlü sıcak karışım tabakaları, tekrarlı ağır yüklere maruz kaldıklarında bünyelerinde iki şekilde tekerlek izi oluşmaktadır. Birinci durumda tekerlek izi, Şekil 2.27'da gösterildiği gibi kaplama tabakasında meydana gelmiş ise sıcak karışımın, trafik yüklerine karşı koyacak kayma mukavemetine sahip olmaması veya plastik akma nedeniyle oluşur. Zayıf bir asfalt tabakasında, her ağır kamyon geçişiyle küçük ama kalıcı deformasyonlar oluşur ve bu deformasyonlar da karışımın aşağı ve kenarlara plastik yer değiştirmesini sağlayarak tekerlek izi oluşumuna neden olur. Plastik akma, karışımın yük altında yanal hareketidir ve karışımında aşırı asfalt ve yuvarlak agrega bulunması ve yetersiz sıkıştırma sonucu oluşmaktadır.



Şekil 2.27. Zayıf bitümlü tabakada tekerlek izi oluşumu (Geçkil, 2008).

Tekerlek izi, Şekil 2.28’de görüldüğü gibi sadece asfalt kaplama tabakasında değil aynı zamanda kaplama altındaki tabakalarda da meydana gelmiş ise bu olay yapısal bir bozulma olarak değerlendirilir. Bu tür bozulmaların nedeni, asfalt kaplama tabakası ve alt tabakaların yetersiz kalınlıkları, temel ve alttemel tabakalarının stabilitelerinin düşüklüğü, zemin tabakasının sağladığı desteğin azlığı ve kaplamanın maruz kaldığı yüklerin büyüklükleri ve şiddetidir.



Şekil 2.28. Zayıf alt tabakalarda tekerlek izi oluşumu (Geçkil, 2008).

Bitümlü sıcak karışımlarda meydana gelen tekerlek izi bozulmalarına karşı, karışımın kayma mukavemetini arttırmanın yolu, karışımda yüksek içsel sürtünme direncine sahip agrega ile yüksek kaplama sıcaklıklarda daha çok elastik bir katı gibi davranan bir asfalt kullanmaktır (Geçkil, 2008; Sağlık ve Güngör, 2006). Yüksek şiddette tekerlek izinde oturmalar Şekil 2.29’da görülmektedir.



Şekil 2.29. Yüksek şiddette tekerlek izinde oturmalar (İsfalt, 2002).

2.5.2.4. Ondülasyon ve Yığılmalar

Ondülasyonlar, yol üzerinde trafiğin akışına göre enine doğrultuda oluşan ve belirli biçimde dalgaya benzeyen, plastik bir hareket sonucu oluşan kaplama deformasyonlarıdır. Bu tip deformasyonlar kavşaklar, otobüs durakları, tırmanma şeritleri gibi kesimlerde ondülasyon şeklinde görülür. Genel olarak, düşük stabiliteli karışım, yetersiz tabaka kalınlığı, düşük viskoziteli asfalt, aşırı asfalt ve ince malzeme miktarı, rutubet miktarı, zayıf yapıştırma tabakası, ince ve iri danelerin köşeli olmaması ve yüzeylerin düzgün ve cilalı olması gibi nedenlerden kaynaklanmaktadır (Asfalt ve Uyg., 2001; Tunç, 2004; İsfalt, 2002).

Oluşum nedenlerini aşağıdaki gibi sıralayabiliriz.

- a) Bitüm karışım stabilitesinin yetersizliği,
- b) Karışımın serilmesi sırasındaki serim ve sıkıştırma hataları,
- c) Kavşak, trafik ışıkları ve duraklarda duruş ve kalkış şeklindeki trafik etkisi,
- d) Üstyapı tabakaları arasındaki bağlantının yetersizliği (Yapıştırma tabakasının fazla veya yetersiz uygulanması),
- e) Temel tabakasındaki stabilite bozukluğunun yüzeye yansımaları,
- f) Köprü tabliyesinde su geçirimsizliği için kalın membran kullanılması,
- g) Ağır trafik altında suya doygun granüler tabakaların varlığı olarak sayılabilir.

Yığılma türü bozulmalar ise, plastik bir hareket sonucu kaplama sathında oluşan bölgesel tümsek ve şişliklerdir. Genellikle trafiğin durup katılığı yerlerde, inişlerde, araçların fren yaptıkları kısımlarda, keskin kurplarda ve araçların bir engele çarpıp sıçrama yaptığı yerlerde oluşurlar.

2.5.2.5. Kabarmalar ve Bombelikler

Kabarmalar, genel olarak doğal zeminin veya üst tabakaların şişmesiyle kaplama tabakasının lokal olarak yukarıya doğru deplasmanıdır. Ana nedeni don etkisidir. Doğal zemindeki suyun donma çözülmesinden ve zeminin şişme karakterine sahip olmasından meydana gelir ve genel nedenleri ondülasyonlarla aynıdır (Asfalt ve Uyg., 2001; Tunç, 2004). Bombelikler derecelendirilmesi hafif, orta ve şiddetli bombelikler olmak üzere üçe ayrılır. Hafif şiddette bombeliklerde, çeşitli yüksekliklerde enine bombelikler ve yerel

kabarmalar, yığılmalar ve ötelenmeler oluşmaya başlar. Sürüş konforunda düşüş hissedilmeye başlanır. Bozuklukların gelişimi sürekli gözlenmelidir. Orta şiddette bombelikler, sürüş konforu belirgin bir şekilde düşer, yol yüzeyi tümsekli bir görünüş alır. Bakım yöntemi olarak, bozuk kesimler freze makinesi ile kesilmeli ve gerekirse yama yapılmalıdır. Yüksek şiddette bombeliklerde, yol yüzeyindeki bozukluklar iyice artar ve sürüş konforu iyice azalır. Güvenli sürüş için hızı azaltma zorunluluğu vardır. Bakım yöntemi olarak, bozuk kesimler freze makinesi ile kesilerek kazılmalı, yama yapılmalıdır. Gerekirse kapsamlı üstyapı etüdü yapılarak yeniden yapım metodu uygulanmalıdır (Doğan, 2006).

2.5.2.6. Lastik Deseni Oluşumu

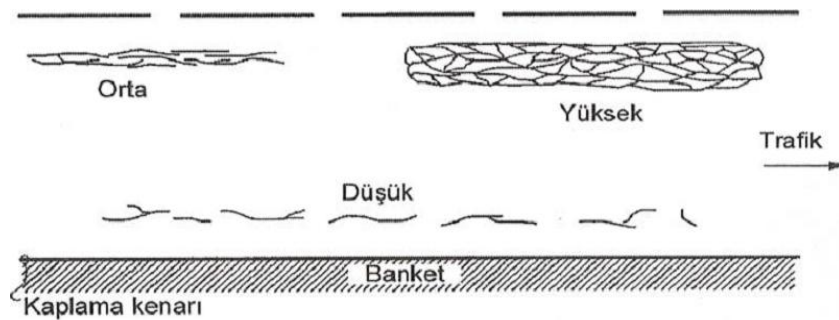
Taşıtların lastik desenlerinin kaplama yüzeyine çıkması olarak görülür. Desen oluşması tam anlamıyla bir bozulma olarak nitelendirilemeyebilir. Fakat meydana geldiği bölgede normal dışı bir durum olduğunu göstermesi açısından önemlidir. Ağır taşıtların uzun süreli park etmelerinden oluşması, stabilite yetersizliğine bağlanabilir. Hareketli taşıtlardan dolayı oluşuyorsa, o kesimde kuma olduğuna işaret eder. Lastik deseni oluşmasının önlenmesi için yüksek stabiliteli karışımlar kullanmak kumayı önleyici önlemler almak gerekmektedir (Kırbaş, 1999).

2.5.3. Çatlamalar

Esnek kaplamalarda görülen çatlaklar aşırı büzülme, aşırı sertleşme ve tabakalar arasındaki aşırı kaymadan kaynaklanmaktadır. Aşırı büzülme veya hacimce azalmadan kaynaklanan çatlaklar en fazla görülen esnek kaplama kusurlarıdır. Trafikğin etkisiyle ilgili olarak çatlaklar, tek veya birçok dingil yükü geçişi ya da dingil yüklerinin aşırı tekrarı sonucu ortaya çıkar. Buna ilaveten, araçların ani hızlanma veya yavaşlamalarının yol açtığı yatay kuvvetler de çatlaklara neden olabilir. Trafikten başka sıcaklıktaki değişimler emici agregaların kullanımı, bitümlü bağlayıcıdaki uçucu madde buharlaşması, ayrıca nem miktarındaki değişimler, çimento veya kireç ile stabilize edilmiş tabakalarda kür esnasındaki hacim değişimleri (büzülme=rötre) gibi bazı dış etkenlerde çatlaklara yol açabilir. Etkenler tek başlarına veya trafik etkileri ile birleşerek üstyapının çatlamasına neden olabilir. Çatlaklar aşağıdaki çeşitlerde olabilir (Tunç, 2001; Çubuk, 2001).

2.5.3.1. Timsah Sırtı ve Yorulma Çatlamları

Bu çatlaklar daha çok taşıtların tekerlek geçişleri dahilinde ortaya çıkar ve üstyapı eksenine paralel olup, uzunlukları birkaç desimetre ile onlarca metre arasında değişen ince çatlaklar biçiminde başlayarak, zamanla tekrarlanmak suretiyle küçük bloklar serisi şeklinde, birbirine bağlı timsah sırtı çatlaklara ve ya kümes teli şekline dönüşen çatlaklardır. Yorulma çatlakları ağır trafik yüklerinin belirli bir tekerrürü sonucu kaplamanın yorulma mukavemetinin ve çekme dayanımının aşılması ile oluşmaktadır. Ayrıca; taban zemini, alttemel veya temel tabakalarının yetersiz sıkışması veya yetersiz drenajı nedeni ile taşıma gücü yetersizliği, uygun olmayan malzeme kullanımı ve kötü yapım teknikleri, çevre ve iklim şartları (donma etkisi, nem değişiklikleri, vs.) gibi etkiler altında, ağır taşıtların teker yörüngesinde meydana gelmektedir. Kaplamanın yorulma mukavemetine ve ağır taşıt trafik hacmine bağlı olarak Şekil 2.30'da görüldüğü gibi hafif, orta veya yüksek şiddette olabilmektedir (Tunç, 2001; Sağlık ve Güngör, 2006; Çubuk, 2001).



Şekil 2.30. Yorulma çatlakları (timsah sırtı çatlaklar) (Tunç, 2004).

Bu tür çatlakların derecelendirilmesi hafif, orta ve yüksek şiddetli timsah sırtı çatlaklar olmak üzere üçe ayrılır. Hafif şiddette timsah sırtı çatlaklarında, timsah sırtı deseni yeni oluşmaya başlamış ve desen oluşumu az sayıda çatlaklardan meydana gelmiştir. Çatlaklar kılcal seviyededir. Bozuklukların gelişimi sürekli olarak gözlenmelidir (İsfalt, 2002). Orta şiddette timsah sırtı çatlaklarında, timsah sırtı oluşumu iyice belirginleşmiş, poligon köşelerinde kopmalar başlamıştır. Çatlakların genişliği artmış ve belirginleşmiştir. Geçici çözüm olarak (bakım amaçlı), bozuk yüzey harç tipi örtü tabakası veya yüzeysel kaplama ile kaplanmalıdır. Onarım yöntemlerinden biri, çatlaklı bölge düzgün bir şekilde kesilip atılmalı, sıcak veya soğuk karışım malzemesi ile yamanmalıdır.

Yüksek şiddette timsah sırtı çatlaklarında, poligon blokları kopmaya başlamıştır. Bazı oyuklar ve lokal oturmalar oluşmuş, kopmalar ileri seviyelere ulaşmıştır. Timsah sırtı çatlakların oluşum nedenleri;

- a) Taban zemini, alt temel ve/veya temel tabakalarının yetersiz sıkışması ve/veya yetersiz drenajı nedeni ile taşıma gücünün yetersizleşmesi,
 - b) Kaplamanın aşırı trafik yükleri altında yorulması,
 - c) Uygun olmayan malzeme kullanımı ve kötü yapım teknikleri,
 - d) Çevre ve iklim şartlarında donma etkisi ve nem değişiklikleridir.
- Orta şiddette timsah sırtı çatlak örneği Şekil 2.31’de görülmektedir.



Şekil 2.31. Orta şiddette timsah sırtı çatlak (İsfalt, 2002).

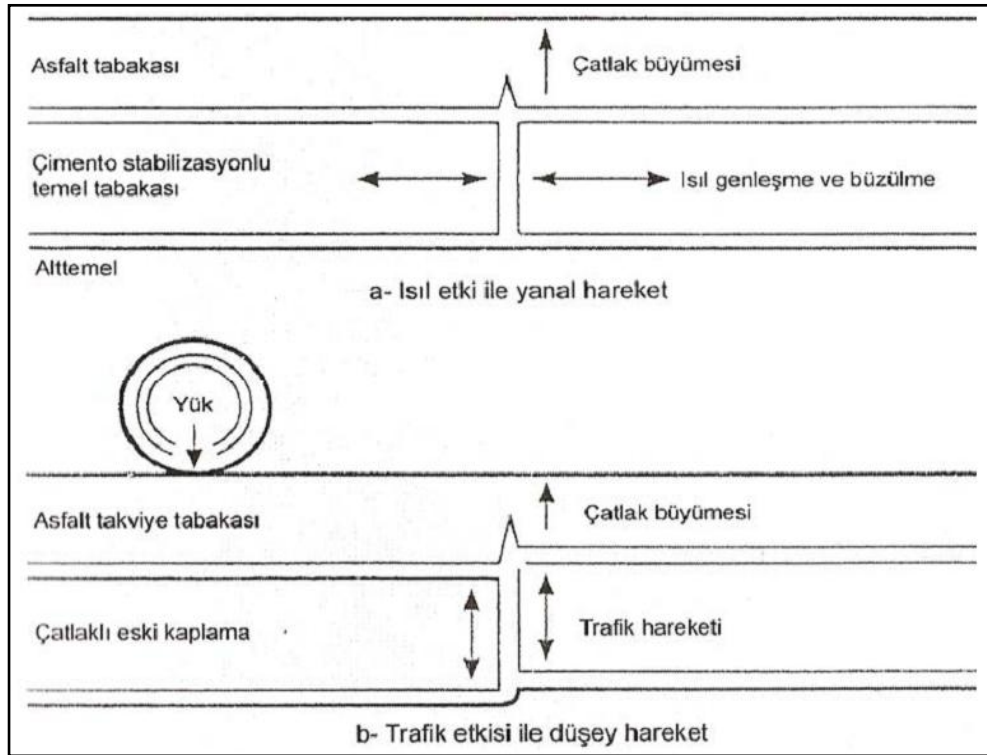
2.5.3.2. Büzülme–Rötre Çatlakları

Üst yapının tüm genişliği boyunca veya bir kısmında bazen de tekerlek geçişlerinde yol boyunca değişken aralıklarda periyodik olarak enine yönde ince çatlaklar olarak başlayan zamanla artarak mozaik veya timsah sırtı şekillerine dönüşen çatlaklardır. Timsah sırtı veya yorulma çatlaklarından farkı birbirine bağlı blokların genellikle keskin köşeli dik açılı ve geniş olmasıdır. Bu tür çatlaklar asfalt betonunun kendi içinde veya temel- alttemel tabakalarda oluşan hacim değişiklikleri sebebiyle oluşmaktadır.

2.5.3.3. Yansıma Çatlakları

Bozulmuş esnek kaplama üzerine asfalt takviye tabakası yapılacak olursa eski kaplamadaki çatlaklar zamanla takviye tabakasında görülmekte ve buna yansıma çatlağı

adı verilmektedir. Yansıma çatlakları, yüzey dağılmasının kaynağı olabilirler. Takviye tabakası altında yer alan üstyapıdaki yatay ve düşey hareket nedeniyle oluşurlar. Bu harekete, trafik, sıcaklık değişmesi nedeniyle genleşme ve büzülme, yüksek kil içerikli alt yapılardaki nem kaybı veya sıralama, bu etkenlerin bileşimi yol açar. Eğer bozulmuş rijit (beton) kaplama üzerine Şekil 2.32’de görüldüğü gibi asfalt takviye tabakası yapılırsa, beton kaplamanın derz yerlerinde takviye tabakasının çatlaması yansıma çatlağına bir örnektir.



Şekil 2.32. Yansıma çatlağının oluşumu

Yansıma çatlakları altındaki çatlaklı tabakanın; ısı değişimi ile yanal hareketi, trafik yükleri ile düşey hareketi sonucu, üstteki yeni tabakanın alt kısmının da çatlamasına neden olmakta ve bu çatlaklar 45° - 90° açı ile yukarı doğru artarak kaplama yüzeyinde görülmektedir (Tunç, 2001; Çubuk, 2001).

2.5.3.4. Kayma Çatlakları

Kayma, yanal hareket veya bir üstyapı tabakasının diğerine göre göreceli olarak yer değiştirmesi olarak tanımlanır. Genellikle asfalt üstyapı, agrega temel tabakası üzerinde veya asfalt yüzey tabakası binder tabakası üzerinde kayar. Kayma çatlakları genel olarak,

kaplama yüzeyi üzerinde çoğunlukla motorlu taşıt tekerleklerinin itme tesiri yönünü belirten parabolik veya ay şeklindeki çatlaklardır. Bu çatlaklar, bazen de iniş eğimli bir yolda fren uygulandığı zaman tekerleklerin itme güzü tersi yönünü gösterir. Kayma çatlakları, yüzey tabakası ve alttaki tabaka arasındaki bağlantı eksikliğinden ve toz, yağ, su ve benzeri yapışmayı engelleyecek malzemelerin bulunmasından oluşur. Düşük gerilme direncine sahip asfalt betonu karışımlarda kayma çatlakları daha kolay oluşur (Kaşak, 2007).

2.5.3.5. Kenar Çatlakları

Kenar çatlakları, genellikle banketten sağladığı yanıl destek yetersizliği nedeniyle kaplama kenarından içeride oluşan boyuna çatlaklar ile banket arasındaki enine çatlaklardan meydana gelir. Ayrıca kaplamanın çatlayan kısmının altında bulunan malzemede oluşan oturma ve çökmelerde kenar çatlaklarının oluşmaktadır. Üstyapı genişliğinin yetersiz olması nedeni ile trafiğin bankete yakın seyretmesi de oluşum nedeni olarak sayılabilir.

Kenar çatlaklarının derecelendirilmesi hafif, orta ve yüksek şiddetli kenar çatlakları olmak üzere üçe ayrılır. Hafif şiddetli kenar çatlaklarında, çatlaklar kaplama kenarına paralel olup bir veya birden çok olabilir. Çatlaklar kaplama kenarından 300 mm içeriye yayılmış olabilir. Bozuklukların gelişimi sürekli gözlenmelidir. Orta şiddetli kenar çatlaklarında, çatlaklar dış tekerlek izine kadar ilerlemiş ya da kaplama kenarından 600 mm kadar içeri ilerlemiştir. Çatlaklar birbirinden bağımsız boyuna çatlaklar olabileceği gibi bazen de dalga şeklinde olabilmektedir. Onarım çalışması olarak, çatlaklı bölge düzgün bir şekilde kesilip atıldıktan sonra uygun bir karışımla yamanmalıdır. Yüksek şiddette kenar çatlaklarında, dalga şeklinde çatlaklar görülmeye başlanmış olup bunlar timsah sırtı desenine dönüşmüş ve dış teker izinden daha da içeri ilerlemiştir. Onarım çalışması olarak, çatlaklı bölge düzgün bir şekilde kesilip atıldıktan sonra uygun bir karışımla yamanmalıdır veya bozuk kesim sathi kaplama ile kaplanmalı ve banket drenajı gerekli bakımla iyileştirilmelidir (İsfalt, 2002; Kaşak, 2007).

Kenar çatlaklarının oluşum nedenleri,

- a) Donma etkisi,
- b) Kaplama kenarında yetersiz taşıma gücü ve üstyapının kenarında aşırı trafik yüklenmesi,

- c) Üstyapı kenarında ve bankette yetersiz drenaj,
 - d) Üstyapı genişliğinin yetersiz olması nedeni ile trafiğin banket kenarına yakın seyretmesidir (Sağlık ve Güngör, 2006; Çubuk, 2001).
- Orta şiddette kenar çatlağı Şekil 2.33’de görülmektedir.



Şekil 2.33. Orta şiddette kenar çatlağı (İsfalt, 2002).

2.5.3.6. Enine ve Boyuna Çatlaklar

Enine çatlaklar yol eksenine dik yönde genellikle köprü yaklaşımlarında ve drenaj yapıları civarında oluşur. Yolun tüm kesitinde birbirlerine yakın olmayan ince kılcal çatlaklar halinde görülür.

Enine çatlakların oluşum nedenleri;

- a) Asfalt kaplamada çok düşük sıcaklıklarda meydana gelen büzülme,
- b) Tabanda don etkisi ve su içeriği değişikliği,
- c) Alt tabakalarda daha önce oluşan çatlakların yüzeye yansması,
- d) Karışım içindeki bitümün sıcaklığa olan yüksek hassasiyetidir.

Enine çatlakların derecelendirilmesi üçe ayrılır. Bunlar hafif, orta ve yüksek şiddetli enine çatlaklardır. Hafif şiddetli enine çatlaklarda, çatlaklar 6 mm' den incedir ve ayrışmamıştır. Çatlaklar, üstyapı genişliği boyunca değişken uzunluktadır. Bozuklukların gelişimi sürekli gözlenmelidir. Orta şiddetli enine çatlaklarda, çatlaklar 6 ile 15 mm arası genişliğe ulaşmıştır. Çatlak boyunca hafif kopmalar oluşmuş ve kılcal çatlaklar meydana gelmiştir. Bakım yöntemi olarak, çatlaklar gerekirse genişletilerek uygun bir dolgu malzemesi ile doldurulmalıdır (İsfalt, 2002). Yüksek şiddetli enine çatlaklarda, tek veya birden fazla çatlaklar ayrışmaya devam edip 15 mm' den fazla açıklığa ulaşmıştır. Bazı

kopmalar ve bozulmalar oluşmuştur. Çatlak oluşumu yaygınlaşmıştır. Geçici çözüm olarak (bakım amaçlı), çatlaklar uygun bir dolgu malzemesi ile doldurulmalıdır. Kalıcı çözüm olarak, özel bir çatlak etüdü yapıldıktan sonra gerekirse zemin iyileştirilmesi ve asfalt kaplamaların yeniden kullanımı metodu veya yeniden yapım metodu uygulanmalıdır (Şekil 2.34).



Şekil 2.34. Yüksek şiddette enine çatlak (İsfalt, 2002).

Boyuna çatlakların oluşum nedenleri;

- a) Dolgularda yetersiz sıkışma ve yetersiz drenaj nedeniyle oturma,
- b) Dolgunun yanal hareketi,
- c) Çevre ve iklim şartları (don etkisi ve nem değişiklikleri),
- d) Üstyapının taşıma gücünün yetersiz oluşu ve bunun trafik yükü ile birleşmesi sonucu oluşan oturmalar.

Boyuna çatlaklarının derecelendirilmesi hafif, orta ve yüksek şiddetli boyuna çatlakları olmak üzere üçe ayrılır. Hafif şiddetli boyuna çatlaklarda, çatlaklar 6 mm' den incedir ve ayrışmamıştır. Çatlak, kaplama kenarına paralel, diyagonal veya kıvrımlar şeklindedir. Bozuklukların gelişimi sürekli gözlenmelidir. Orta şiddetli boyuna çatlaklarda, çatlaklar 6 ile 15 mm arası genişliğe ulaşmıştır. Ayrışmalar başlamış ve çok yönlü kılcal çatlaklar oluşmuştur. Bakım yöntemi olarak, çatlaklar gerekirse genişletilerek uygun bir dolgu malzemesi ile doldurulmalıdır. Yüksek şiddetli boyuna çatlaklarda, tek veya birden fazla çatlaklar ayrışmaya devam edip 15 mm' den fazla açıklığa ulaşmıştır. Ayrışmalar derinleşmiş ve çatlak sayısı artmıştır. Geçici çözüm olarak (bakım amaçlı), çatlaklar uygun bir dolgu malzemesi ile doldurulmalıdır. Kalıcı çözüm olarak, özel bir çatlak etüdü

yapıldıktan sonra gerekirse zemin iyileştirilmesi ve asfalt üstyapının yeniden kullanımı metodu veya yeniden yapım metodu uygulanmalıdır (Şekil 2.35).



Şekil 2.35. Yüksek şiddette boyuna çatlak (İsfalt, 2002).

2.5.3.7. Blok Çatlakları

Blok (harita) çatlaklar; şişme ve büzülme etkisi, donma etkisi ve asfalt kaplamanın yaşlanmasından dolayı sertleşmesi ve kırılmasından meydana gelen bozulmalardır. Blok çatlaklar hafif, orta ve yüksek şiddetli blok çatlaklar olmak üzere üçe ayrılır. Hafif şiddetli blok çatlaklarda, çatlakların genişliği 6 mm' den incedir. Boyuna ve enine çatlaklar birbiri ile birleşerek harita şeklinde görünürler. Bozuklukların gelişimi sürekli gözlenmelidir. Orta şiddetli blok çatlaklarda, çatlaklar 6 mm ile 15 mm arası genişliğe ulaşmıştır. Çatlak formasyonu bir veya birden fazla çatlağın ayrılıp kopması şeklindedir. Geçici çözüm olarak, bozuk yüzey harç tipi örtü tabakası veya yüzeysel kaplama ile kaplanmalıdır. Kalıcı çözüm olarak, bozuk yüzeye ya asfalt kaplamaların yeniden kullanım metodu ile ya da düzeltme tabakası ve geotekstil ile düzeltildikten sonra takviye kalınlıklar uygulanmalıdır (Şekil 2.36).



Şekil 2.36. Orta şiddetli blok çatlaklar (İsfalt, 2002).

Yüksek şiddetli blok çatlaklarda, çatlaklar çok yönlü olarak ayrılmaya devam edip 15 mm' den fazla açıklığa ulaşmıştır. Timsah sırtı çatlaklar oluşmuştur. Bakım yöntemi olarak, detaylı üstyapı etüdü yapıldıktan sonra bozuk yüzey asfalt kaplamaların yeniden kullanımı metodu ile iyileştirilmelidir veya yeniden yapım metodu uygulanmalıdır (Şekil 2.37).



Şekil 2.37. Yüksek şiddetli blok çatlaklar (İsfalt, 2002).

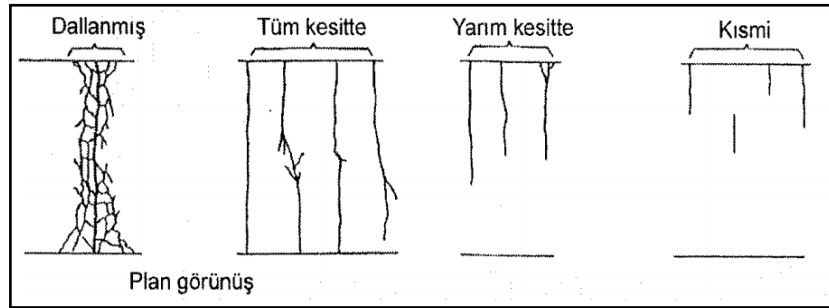
2.5.3.8. Düşük Sıcaklık Çatlakları

Düşük sıcaklık çatlakları soğuk havalarda asfalt kaplamanın büzülmesi ve bitümlü bağlayıcının çok rijit bir hal alarak ağır yükler altında gevrek davranışı ile oluşmaktadır. Enine büzülme çatlakları genellikle üniform aralıkta ve yol eksenine dik olarak görülmektedir. Düşük ısı çatlakları termal çatlaklar olarak da adlandırılabilir. Fakat enine büzülme çatlakları trafiğin etkisiyle oluşabilmektedir. Soğuk hava etkisi ile büzülen asfalt kaplamanın çekme mukavemeti aşıldığında düşük ısı çatlakları oluşmaktadır. Düşük ısı

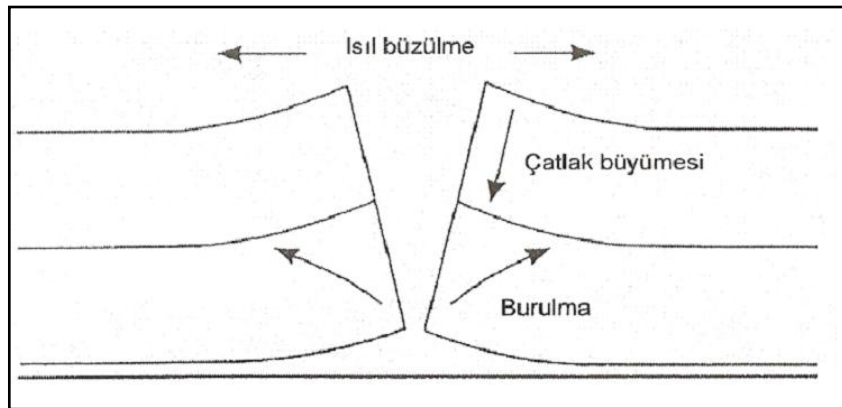
çatlakları yüzeyde kılcal çatlak şeklinde başlar ve soğuma tekerrür sayısı ile ağır taşıt trafiğinin yoğunluğu ile zamanla derinliği artar.

Kaplamanın enine büzülmesi boyuna büzülmesinden daha kolay olduğu için genellikle 6–9 metre aralıklarla enine oluşmaktadır. Kış şartlarında büzülmeye çalışan kaplama yüzeyinde büyük çekme gerilmeleri oluşur ve bu tekrarlı çekme gerilmeleri, kaplamanın çekme mukavemetini aştığında, Şekil 2.38’de görüldüğü gibi yüzeyde çatlaklar meydana gelir. Bu düşük sıcaklık çatlakları, ağır dingil yükleri nedeniyle ortaya çıkan gerilmelerle birlikte Şekil 2.39’da olduğu gibi yüzeyden başlayıp alta doğru derinleşerek inen yapısal bozulmalara yol açar.

Bu çatlakların en önemli nedeni asfaltın kıvamı ve sıcaklığa olan duyarlılığıdır. Düşük sıcaklıklarda rijit bir davranış gösteren asfalt, çekme gerilmesi altında deformasyon göstermeden kırılma gösterir. Bu sebeple soğuk bölgelerde yumuşak ve sıcaklığa az duyarlı asfalt kullanmak bu tür çatlakların azalmasını sağlar. Ayrıca, karışımda kullanılacak asfalt miktarı, asfaltın yaşlanması, karışımın rijitliği, hava sıcaklığı ve çok soğuk gün sayıları, kaplama kalınlığı ve tabakalar arasındaki sürtünme kuvvetlerini de dikkate almak gerekir (Tunç, 2004; Balta, 2004; Geçkil, 2008).



Şekil 2.38. Düşük sıcaklık çatlakları şekilleri (Kaşak,2007).



Şekil 2.39. Düşük sıcaklık çatlaklarının büyüme aşaması (Kaşak,2007).

2.5.4. Ayırışmalar

Agrega tanelerinin iklim ve trafiğin mekanik etkisi ile kaplamadan kopması sonucu meydana gelen ve karayollarında çok sık görülen bozulmadır. Ayırışmalar; segregasyon, sökölme, soyulma ve çukurlar olarak görülür. Segregasyon, soyulma ve sökölme (yani yüzeysel kopma ve parçalanmalar) tipi kusurlar agregadan bitüm soyulması, trafiğin aşındırma etkisi ve aşınma tabakasının kalınlığı ile stabilitesinin az olmasından, yetersiz bitüm yüzdesinden, yaşlanma nedeniyle bitümün sertleşmesinden, bitümlü sıcak karışım içinde kil topraklarının ve kille kaplı agregada tanelerinin bulunması, donma-çözölme olaylarının sık tekrarı gibi nedenlerden oluşmaktadır. Bu tip bozulmalar ilerleyerek çukurların oluşmasına neden olmaktadır (İlcalı, 2001; Sağlık ve Güngör, 2006).

2.5.4.1. Soyulmalar

Agrega tanelerini saran ince asfalt filminin çeşitli etkilerle agregadan ayrılması sebebiyle agregada tanesinin çıplak kalmasıdır.

Soyulmaların oluşma nedenleri;

- a) Su ve trafik etkisi ile soyulma,
- b) Bitümlü sıcak karışım içinde kil toprakları veya kille kaplı agregada bulunması,
- c) Zayıf sıkışma ve yüksek boşluk yüzdesi,
- d) Yetersiz asfalt yüzdesi,
- e) Yaşlanma nedeni ile oluşan asfalt sertleşmesi,
- f) Uygun olmayan yapım teknikleri ve ekipman kullanımı,
- g) Donma çözölme olaylarının tekrarlanması ile absorpsiyonu ve kırılabilirliği yüksek agregaların kullanıldığı karışımlarda, ayırışma meydana gelmesidir.

Soyulmalarla derecelendirilmesi hafif, orta ve şiddetli olmak üzere üçe ayrılır. Hafif şiddetli soyulmalar, yüzeyde agregada kaybı başlamıştır. Kaplama karışımının dokusal görüntüsünde hafif bir artış meydana gelmiştir. Bozuklukları gelişimi sürekli olarak gözlenmelidir. Orta şiddetli soyulmalarda, yol yüzeyindeki agregada kaybı artmıştır. Hızlanan agregada kaybı, kaplamada açık görünümlü bir doku meydana getirmiştir. Onarım çalışması olarak, harç tipi örme tabakası veya sathi kaplama yapılmalıdır (İsfalt, 2002) (Şekil 2.40).



Şekil 2.40. Orta şiddette soyulma (İsfalt, 2002).

2.5.4.2. Sökülmeler

Bu tip bozulmalar aşınma tabakasının parça veya tabaka halinde soyulması şeklinde meydana gelir. Asfalt ve agregası arasındaki bağın zayıflaması sebebiyle agregaların zamanla satıhtan koparak satıhtan aşağıya ya da kenardan içeriye doğru ayrılmasıdır. Sökülme, agregası danelerinin yavaş yavaş yüzeyden aşağıya doğru kopması ile oluşur. Önce ince malzemelerin kopması ile çok küçük çukurlar oluşur ve daha sonra aşındırma ile daha büyük parçalar koparak sökülmeler meydana gelir. Sökülmeler genel olarak yapım sırasındaki yetersiz sıkıştırma, kirli veya dağılan agregası kullanımı, yetersiz drenaj, soğuk ve nemli havada imalat, asfalt miktarı azlığı, ince tabaka kalınlığı ve asfalt karışımının aşırı ısıtılması gibi nedenlerden meydana gelir. Ayrıca asfaltın oksidasyon ve polimerizasyon gibi nedenlerle yaşlanması sökülmenin oluşumunda önemli rol oynar. Tabakalar halindeki sökülmeler, yüzey tabakasının ince olması, alt tabaka ile yüzey tabakası arasında yapışma tabakası olmaması ve yapıştırmanın yetersiz olması sebepleriyle oluşur. Sökülmenin üst düzeydeki göstergesi, çanak şeklinde, çapları 25 cm ile 75 cm arasında değişen ve farklı derinlikteki çukurlar şeklinde görülür (Tunç, 2004; Sağlık ve Güngör, 2006).

2.5.4.3. Çanak Şekli Oluşumlar

Kaplama tabakası üst yüzeyinde takriben 25-75 cm. çapında oluşan dairesel, folluk şeklinde görülen oyuklardır. Bu tip bozulmalar kaliteli bağlayıcı ve karışım kullanılması, üst yapının trafiğin gerektirdiği şekilde inşa edilmesi, kaliteli işçilik ve özellikle yeterli sıkıştırma yapılması ile önlenabilir.

2.5.4.4. Kuma

Karışım içindeki asfaltın aşırı sıcaklık sebebiyle yükselerek yüzeye çıkması ve yüzeyde kalın bir asfalt film tabakası oluşturması şeklinde görülür. Kuma sonucu yüzeydeki agregalar tamamen asfalt film tabakası ile kaplandığından sürtünme katsayısı düşmektedir. Kuma daha çok asfalt yüzdesi yüksek karışımlarda yüksek hava sıcaklıklarında ortaya çıkar. Çok ağır dingil yüklerinde de asfalt yüzeye çıkabilir. Asfalt yüzdesi optimum olmakla beraber, karışımda boşluk yüzdesi çok düşükse, hava sıcaklığı yüksek olduğunda genleşen ve boşluk bulamayan asfalt yine yüzeye çıkma eğilimi gösterecektir. Çok kalın serilen astar veya yapışma tabakaları da kumaya sebep olabilir. Karayollarında bakım yapılan kısımlarda görülen kuma, bağlayıcı ve boşluk yüzdesine dikkat edilerek önlenabilir (İlıcılı, 2001; Çubuk, 1998; Kırbaş,1999).

2.5.4.5. Cilalanma

Agregaların aşınarak pürüzlülüklerini kaybetmesidir. Özellikle kalkerden elde edilen agregalar, başlangıçta köşeli ve pürüzlü olsalar bile taşıtların aşındırma etkisiyle pürüzlülüklerini kaybederek cilalı bir hal almasıdır. Kaplama tabakası ile taşıt tekerlekleri arasındaki sürtünme katsayısı, özellikle kaplamanın ıslak olması halinde azalır ve özellikle 60-80 km/h' dan daha yüksek hızlarda kaymalara neden olabilir. Yüzey tabakalarında kullanılacak agregaların cilalanma özelliği bakımından dikkatli seçilmesi gerekir.

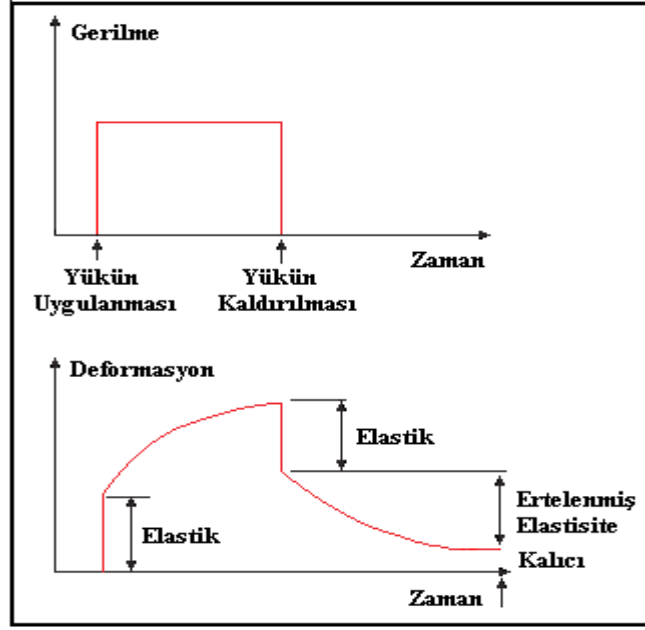
3. BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIMLARDA KATKI KULLANIMI

Bitüm yol üst yapısında kullanılan en önemli bağlayıcıdır. Doğal ya da pirojenik kökenli hidrokarbonların bir karışımı ve ya bunların her ikisinin bir kombinasyonu olup çok defa bunların gaz, sıvı, yarı katı ya da katı olabilen, metal dışı türevleriyle bir arada bulunan, yapıştırıcı özellikleri olan ve karbon disülfürde tamamen çözünen maddeye bitüm denilmektedir. Yani tanım itibarıyla karbon disülfürde tamamen eriyen hidrokarbon bir maddedir. Bitüm, reolojik yapı olarak viskoelastik ve termoplastik özellik göstermektedir. Viskoelastik malzemeler yüksek hızlı yüklemelerde elastik davranış ve yüksek mukavemet gösterirken, düşük hızlı yüklemelerde viskoz davranış ve düşük mukavemet gösterirler. Termoplastik malzemeler yüksek sıcaklıklarda düşük mukavemet, düşük sıcaklıklarda ise yüksek mukavemet gösterirler (Kuloğlu, 2001).

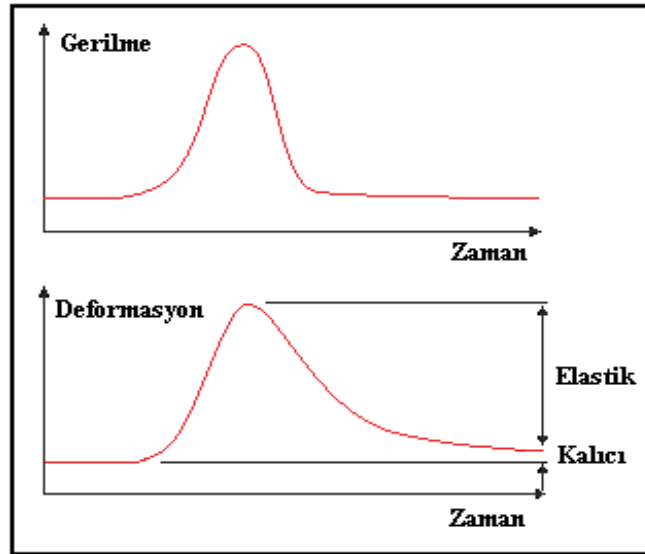
Bitüm agregalarla karıştırıldığında reolojik özellikler karışıma da geçer. Dolayısıyla bitümlü karışımlar da, bu arada en yaygın sıcak karışım olan asfalt betonu da viskoelastik bir malzemedir. Bu itibarla belirli bir iş için asfalt seçimi önemli bir karardır. Çünkü söz konusu tabakanın mekanik davranışını, performansını ve hizmet ömrünü etkileyecektir (Uluçaylı, 1998-2).

Başta çatlama ve kalıcı deformasyon dayanımı olmak üzere, yol performansının birçok parametresinde büyük rol oynayan bitüm, asfalt karışımlarının da viskoelastik özellik göstermesine sebep olmaktadır (Lav ve Lav, 2004). Genel olarak, kaplama yapısında oluşan deformasyon miktarı, yükleme süresine ve sıcaklık değerine bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Şekil 3.1 ve Şekil 3.2 esnek kaplamalara uygulanan yük sonucunda oluşan gerilme ve deformasyonların zamanla değişimini göstermektedir (Whiteoak ve Read, 2003).

Şekil 3.1’de görüldüğü gibi; yükün etki etmesiyle oluşan ani deformasyonu, yük kaldırılınca kadar dereceli olarak artan deformasyon takip etmektedir. Zamana bağlı olarak deformasyonda meydana gelen bu değişim malzemenin viskoelastik özelliğinden kaynaklanmaktadır. Yükün kaldırılmasıyla elastik deformasyon ani olarak geri dönmekte ve zamanla ertelenmiş elastisite adı verilen bir kısım geri dönüşüm daha meydana gelmektedir. Sonuçta, geri kazanılamayan ve doğrudan viskoz davranışın sebep olduğu bir miktar kalıcı deformasyon meydana gelmektedir.



Şekil 3.1. Bitümün statik yükler karşısındaki davranışı (Whiteoak ve Read, 2003).



Şekil 3.2. Bitümün dinamik yükler karşısındaki davranışı (Whiteoak ve Read, 2003).

Şekil 3.2’de, bitümlü sıcak karışımların (BSK) hareketli trafik yüklerine karşı davranışı görülmektedir. Deformasyon - zaman grafiğinde, her ne kadar yükün etkisinden önce ve sonra deformasyon değerleri aynı gibi görülse de çok küçük miktarlarda da olsa kalıcı deformasyonlar meydana gelmektedir. Sadece bir tekerlek yükü için tanımlanan küçük deformasyonlar, milyonlarca tekerlek yükü tekrarı sonucunda kaplama yapısında büyük bozulmalara sebep olmaktadır.

Kaplamaların farklı performans parametrelerine olumsuz etkide bulunmadan oluşan bozulmaları engellemek ya da geciktirerek kaplama servis ömrünü uzatmak amacıyla katkı maddeleri kullanılmaktadır. Katkı kullanımı genel olarak iki türlü yapılabilmektedir. Bunlar;

- Katkı maddesi bitüme katılarak, *modifiye bitüm* elde edilir.
- Katkı maddesi, asfalt plentinde doğrudan karışıma katılarak, *modifiye karışım* elde edilir.

Bitümün modifikasyonunda, modifiye bitüm üzerinde çeşitli standart test yöntemleri uygulayarak bağlayıcı özelliklerindeki değişikliklerin tespit edilmesi mümkündür. Bu sayede, modifiye bitümün özelliklerinin belirlenmesi ve değerlendirilmesi yapılabilmektedir. Ancak bitümün modifiye edilmesi yönteminde, bu işlem için genellikle ek ekipmanlar gerekmekte, hazırlanan modifiye bitümün depolanması ve taşınması gibi sorunlar ortaya çıkmaktadır (Ilıcalı, 2001).

Bitümlü bağlayıcılar ve bitümlü karışımların modifiye edilmeleri ile yol üst yapılarının yüksek yol sıcaklıklarında yeterli rijitliğe sahip olarak, oluklanma ve ötelenme gibi deformasyonlara karşı dirençli olması, düşük yol sıcaklıklarında da yeterli esnekliğe sahip olarak çatlamalara ve kırılmalara karşı dirençli olmaları amaçlanmaktadır. Ayrıca; kaplamanın trafik yükleri altında yorulma nedeniyle meydana gelen çatlamalar ile su etkisiyle meydana gelen soyulmalara karşı dirençli olması ve kaplama yüzeyinde istenilen seviyede kayma direncinin elde edilerek sürüş emniyetinin sağlanması da yine amaçlanan hedeflerdendir. Bitümün modifiye edilme sebepleri maddeler halinde aşağıdaki gibi sıralanabilir:

1. Düşük servis sıcaklıklarında daha esnek karışımlar elde etmek ve böylece çatlakları azaltmak,
2. Yüksek servis sıcaklıklarında daha sert karışımlar elde etmek ve böylece tekerlek izlerini (oluklanmayı) azaltmak,
3. Kayma direnci yüksek kaplama yüzeyleri elde etmek,
4. Karışımların stabilitesini ve mukavemetini arttırmak,
5. Karışımların yorulma direncini arttırmak,
6. Yaşlanmış (oksidasyona uğramış) asfalt bağlayıcıları gençleştirmek,
7. Düşük kaliteli agregaları kullanılır hale getirmek,

8. Agregaların üzerinde kalın bağlayıcı filmleri oluşturarak, bağlayıcı ve agregaların birbirine yapışma özelliğini iyileştirip, soyulmayı azaltmak,
9. Akmayı ya da kusmayı azaltmak,
10. Yakıt dökülmelerine karşı dayanım sağlamak,
11. Yaşlanmaya ya da oksidasyona karşı dayanımı arttırmak,
12. Kaplama tabakalarının yapısal kalınlıklarını azaltmak ve daha ince aşınma tabakalarının kullanımını mümkün kılmak,
13. Yansıma çatlaklarını geciktirmek,
14. Uygulama alanlarını zenginleştirmek,
15. Absorbsiyonu minimize etmek,
16. Kaplamaların her bakımdan performansını yükseltmek,
17. Kaplamaların uzun vadede ekonomik olmasını sağlamak (Birliker, 1998).

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

Bilindiği gibi, bağlayıcı özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan standart deney yöntemleri, karışım özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan deney yöntemlerine göre daha kısa sürede yapılabilmektedir. Karışıma yönelik deneylerde, daha uzun sürelerle, daha fazla işlemlere ve daha kapsamlı deney ekipmanlarına gereksinim duyulmaktadır (İlcalı, 2001).

Bitümlü sıcak karışımlarda kullanılan katkı maddeleri çeşitli şekillerde sınıflandırılabilir. Katkı maddesinin tipini, örneklerini ve katkı maddesinin kıvamına etkisini gösteren genel bir sınıflandırma Tablo 3.1’de verilmiştir (İlcalı, 2001).

Kullanımı oldukça artan modifiye bitümler ve karışımlar konusundaki çalışmalarda son yıllarda polimerler temel alınarak; polimer olan katkı maddeleri ve polimer olmayan katkı maddeleri şeklinde sınıflandırmada yapılmaktadır. Bitüm ve bitümlü karışımların modifikasyonunda kullanılan katkı maddelerini ve etki ettikleri yapısal bozulma şekilleri Tablo 3.2’de gösterilmiştir.

Tablo 3.1. BSK katkı maddelerinin genel sınıflandırılması (İlıcılı, 2001).

Tip	Özellikler	Modifiyerin Bağlayıcı Kıvamına Etkisi
1. Filler	• Mineral Filler Taş Tozu Kireç Portland Çimentosu Uçucu Kül • Karbon Siyahı • Sülfür	Sertleştirme
2. Genleştirici (Ekstender)	• Sülfür • Lignin (Odun Özü)	Sertleştirme
3. Kauçuk a. Doğal Lateks b. Yapay Lateks c. Blok Kopolimer d. İşlenmiş Kauçuk	POLİMERLER • Doğal Kauçuk • SBR • SBS • Dönüştürülmüş Kauçuk	-
4. Plastik		Sertleştirme
5. Bileşim		-
6. Fiber	• Doğal: Asbest Taş Yünü • Yapay: Polipropilen Polyester Fiberglas	Sertleştirme
7. Oksidan	• Manganez Tuzu	Sertleştirme
8. Antioksidan	• Kurşun Karışımları • Karbon • Kalsiyum Tuzu	Yumuşatma
9. Hidrokarbon	• Yeniden Kullanma ve Genleştirme Yağları • Doğal Asfaltlar	Yumuşatma ve Sertleştirme
10. Soyulma Önleyici	• Aminler • Kireç	Yumuşatma

Tablo 3.2. Farklı tipteki modifiyerlerin sağladıkları faydalar (Whiteoak ve Read, 2003).

Modifiyer	Kalıcı Deformasyon	Termal Çatlama	Yorulma Çatlağı	Nem Hasarı	Yaşlanma
Elastomerler	+	+	+		+
Plastomerler	+				
İşlenmiş Kauçuk		+	+		
Siyah Karbon	+				+
Kireç					+
Sülfür	+				
Kimyasal Modifiyerler	+				
Antioksidanlar					+
Hidrate Kireç				+	+

Bitüm ve agreganın her ikisinin de ısıtılıp karıştırılmasıyla elde edilen karışımlara bitümlü sıcak karışımlar (BSK) denilmektedir. Bitümlü sıcak karışımlar, karışım içerisine dağılmış halde bulunan agregaya, bitümlü bağlayıcı ve hava boşluğundan oluşan kompozit bir yapıya sahiptir (Tunç, 2004). Malzemeye bağlı olarak bitümlü sıcak karışımların mekanik özellikleri; farklı bağlayıcı-agrega kombinasyonlarının, agregaya gradasyonlarının ve modifikasyon tekniklerinin kullanılmasına göre farklılık göstermektedir.

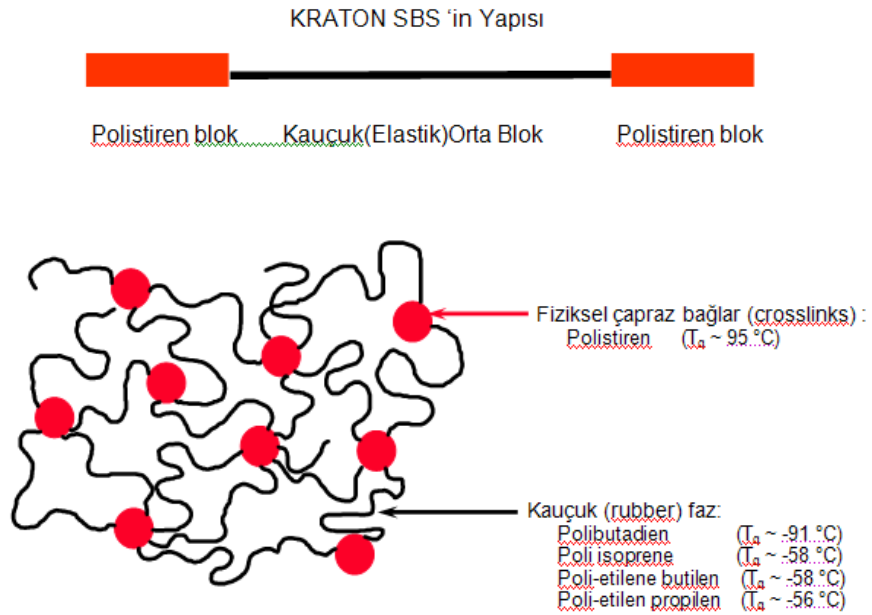
Bitümlü sıcak karışımların özelliklerini iyileştirerek üstyapının performansını arttırmak amacıyla katkı maddeleri kullanılmaktadır. Katkı maddeleri bitümlü bağlayıcıyla karıştırılabildiği gibi doğrudan karışıma da eklenebilmektedir (Jones, 1990). Bitüme eklenen katkı malzemeleri içerisinde en fazla polimer grubu malzemeler kullanılmaktadır (Isacsson ve Lu, 1995). Yapılan çeşitli çalışmalarda polimer kökenli polietilen (PE), polipropilen (PP), poli-vinil-klorid (PVC), polistiren (PS), stiren-etilen-butadien-stiren (SEBS), etilen vinil asetat (EVA) ve stiren-butadien-stiren (SBS) gibi termoplastik malzemeler bitüm modifikasyonunda denenmiş ve normal servis sıcaklığında bitümün sertliğini ve viskozitesini arttırdıkları belirlenmiştir (Isacsson ve Lu, 1999; Aglanve diğ. 1993; Tayfur ve diğ., 2007; Yıldırım, 2007).

Amacına uygun bir modifiye bitüm elde etmek için, bitümün kimyasal yapısının uygun olması ayrıca bitüm içindeki polimerin iyi bir şekilde dağılması gerekmektedir. Polimer türü bitüm katkı malzemeleri arasında en sık kullanılanlar; etilen-vinil-asetat (EVA) ve stiren-butadien-stiren (SBS) kopolimerlerdir.

3.1. Bitümlü Sıcak Karışımlarda SBS Kullanımı

SBS, stiren–butadiyen–stiren blok kopolimerinin kısaca adlandırılmasıdır. Bulunuşu Shell firması tarafından 1960’larda yapılan petrokimya türevi bu sentetik kauçuk ailesi, ayakkabı tabanı, su yalıtım membranı, polimer ve bitüm modifikasyonu, hot-melt yapıştırıcılar gibi endüstriyel birçok alanda hammadde olarak kullanılmaktadır. SBS, esnek kaplamalarda 1985 yılından beri kullanılmaktadır.

Kraton D 1101 ticari ismine sahip SBS’in yapısı Şekil 3.3’te görüldüğü üzere lineer bir yapıya sahiptir.

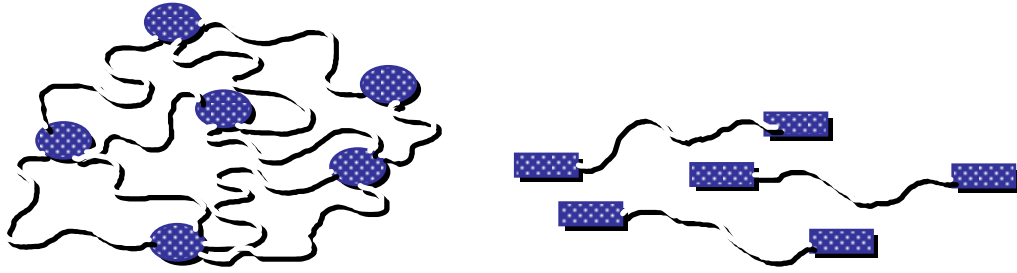


Şekil 3.3. SBS türü polimerlerin yapısı

SBS’in yapısı incelendiğinde aşağıdaki sonuçlar çıkarılabilmektedir:

- Polistiren adacıkları fiziksel çapraz bağlar oluşturarak sağlamlık verir.
- Polibütadien köprüleri elastiklik ve esneklik sağlar.
- 100°C nin üstünde polimer akıcı hale gelir soğuyunca üç boyutlu ağ yapısı tekrar oluşur. Madde termoplastik elastomer olduğu için bu ısıtma ve soğumalarda özelliğinden hiçbir şey kaybetmez.
- -40°C ile +80°C arasında özelliğini korur.

SBS ile bitümün karıştırılması tamamen bir çözünme olayı olup kimyasal bir reaksiyon değildir. SBS bitüm içindeki kendine benzeyen yapıları içine alarak hacminin 10 katına kadar şişmektedir. Böylece %5 oranında SBS, bitüme katıldığında, %50'si polimer fazı olan bir karışım elde edilmektedir. Bitüm içinde ısıtıldığında SBS ağ yapısından sıyrılarak akıcı hale gelmekte ve bitümle kolayca karışmaktadır. Karışımın yumuşama noktasının altına inildiğinde ise üç boyutlu ağ yapısı tekrar oluşmaktadır (Şekil 3.4). Bu yapı karışıma volkanize kauçuk kadar sağlamlık vermektedir.



Şekil 3.4. Bitümle karışım sıcaklığında ve düşük sıcaklıklarda SBS'in yapısı

SBS'in bitüme ne oranda katılacağı tamamen uygulama bölgesi iklim ve trafik şartlarına ve kullanılan bitümün özelliklerine bağlıdır. Bitüm içinde sürekli bir polimer fazı oluşturmak için minimum %3 oranında SBS kullanılmalıdır. En fazla oranda ise %7'ye kadar SBS kullanıldığı görülmüştür.

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

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

Farklı SBS çeşitlerine uygun olarak yüksek sürtünme güçlü veya düşük devirli karıştırıcı ekipmanlar kullanılarak polimer modifiye bitüm (PMB) üretmek mümkündür. Tamamen çözünme olduktan sonra karışımın bir süre olgunlaşması için beklenmesi tavsiye

edilmektedir. Böylece SBS'in bitümün tüm uygun bileşenlerini bünyesine alması sağlanmaktadır.

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

SBS ile modifiye edilmiş bitümün kullanılmaması durumunda bozulmayacağı, kısa süreli (birkaç günden 1–2 haftaya kadar) depolama yapılması gerektiğinde 130°C–140°C sıcaklıkta karışımın düşük devirli karıştırıcı ile sürekli karıştırılarak homojen tutulması gerekmektedir. Daha uzun süreli depolama gerektiğinde ise karışımın soğutulup daha sonraki kullanımlar için saklanabileceği ayrıca SBS'in bitüm içinde tamamen çözünmesi sağlandığı takdirde pratikte bir sorunla karşılaşılmayacağı üretici firma tarafından belirtilmektedir. Shell firması tarafından üretilen KRATON SBS tipleri aşağıda belirtilmiştir:

- D 1101 linear
- D 1184 radial
- D 1186 radial
- D 1116 radial
- D 1192 radial
- D 1118 di-block

KRATON D 1101 yol uygulamalarında en fazla kullanılan üründür. KRATON D 1192 polimerinin stabilite ve yaşlanma direnci açısından özellikle modifiye bitüm emülsiyonu uygulamalarında daha iyi sonuçlar verdiği belirtilmektedir. Shell firması tarafından üretilen KRATON D 1101 ve D 1192 SBS türlerinin özellikleri Tablo 3.3'te verilmiştir.

Tablo 3.3. KRATON D 1101 ve D 1192 SBS türlerinin özellikleri

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

Üç tip Kraton D 1101 SBS polimer bulunmaktadır. Bunlar;

- Kraton D 1101 CS → Gözenekli granül görünümünde olanlar
- Kraton D 1101 AF → Patlamış mısır görünümünde olanlar
- Kraton D 1101 CM → Toz halinde olanlardır.

Bütün bu ürünlerde tanelerin birbirine yapışmasını önlemek için amorf silika kullanılmıştır.

Kraton polimerleri güvenlik açısından değerlendirildiğinde; depolama yerinin normal oda sıcaklığında, iyi havalandırılmış, güneş ışığını doğrudan almayan, kıvılcım kaynaklarından uzakta olması gerekmektedir. Normal emniyetli şartlarda kullanıldığı durumlarda Kraton D 1101 polimerinin insan sağlığını kötü yönde etkilediğini gösteren bir kanıt bulunmamaktadır. Kraton polimerlerinin toksik olmadığı ayrıca nötr ve biyolojik olarak aktif olmayan malzemeler oldukları tespit edilmiştir. Isınma ve tanelerin aşırı hareketi nedeni ile oluşabilecek statik elektriklenmenin artmasını önleyecek tedbirler alınması gerekmektedir. Kraton polimerlerinin yüksek sürtünmeli değirmenlerde kullanılması ısı artışına yol açmaktadır. Bu sırada sıcaklığın 225–230°C'nin üstüne

çıkmasına dikkat edilmelidir. Bu sıcaklıklar aşılsa yangın riskine karşı tedbirler alınmalıdır.

Kalıcı deformasyon (tekerlek izi oluşumu), çatlama (termal ya da yorulma), nem hasarı esnek kaplamalarda en fazla karşılaşılan bozulma çeşitleridir. Kalıcı deformasyon, yola etkiyen yükün oluşturduğu çok küçük deformasyonların birikerek kaplama yüzeyini bozması sonucu oluşmaktadır. Sıcaklığın artışı bu bozulmayı hızlandırmaktadır. SBS'in yapısında var olan yüksek elastiklik ve artan viskozite kalıcı deformasyonu önemli ölçüde geciktirmektedir. Sıcaklık düşüşü ile bitüm gevrek bir yapı almaktadır. Mevsimsel değişikliklerle artan gerilmeler termal çatlaklara neden olmaktadır. Gece-gündüz sıcaklık farklarından da beslenen termal çatlama, bitümün sertleşmesi ile ilgilidir. Sıcak bölgelerde bile termal çatlama görülmesinin nedeni bu bölgelerde sert bitüm kullanılmasıdır.

Çatlak oluşumu ve bu çatlakların büyümesi sonucu esnek kaplamalarda büyük sorunlar meydana gelmektedir. Başlangıçta oluşan mikro çatlaklar kaplamanın ısınması ile eski halini alsa da eğer bu çatlakları hapseden kuvvetli bir bitüm yapısı bulunmuyor ise oluşan bu mikro çatlaklar büyümekte ve makro çatlaklara dönüşmektedir. Termal çatlama mekanizması yorulma çatlakları için de geçerlidir. Sayısız küçük bozulmalarla oluşan mikro çatlaklar daha sonra yolun yüzeyine doğru ilerleyen makro çatlaklar haline gelmektedir. Oluşan çatlaklar yolun yüzeyini bozacağından kaplama yapısından içeri giren suyun özellikle soğuk iklimlerde temel tabakasına kadar tahribata yol açmasına neden olmaktadır.

SBS modifiye bitümlü asfalt, üç boyutlu ağ yapısı ve elastik kauçuk adacıkları ile mikro çatlakları hapsedmekte ve büyüyüp yayılmasını önlemektedir. Özellikle ağır trafik yükü ve sıcaklık farkının fazla olduğu bölgelerde, SBS'li modifiye bitüm kullanılması yaygın bir uygulama çeşididir. SBS, üstün adezyon, kohezyon ve elastik özelliklerinden dolayı sürtünmelerden kaynaklanan soyulma ve agregaya kaybına karşı da dayanımı arttırmaktadır.

Aglan ve ekibi (1993), SBS katkı maddesinin bitümlü sıcak karışımların yorulma ömrü üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Uygulanan deneyler sonucu SBS'in bitümlü sıcak karışımların yorulma ömrünü önemli oranda arttırdığı tespit edilmiştir (Aglan ve diğ., 1993).

Lu ve Isacson (1998), yapmış oldukları çalışmada Stiren-Bütadiyen-Stiren içeren modifiye bitümlerin düşük sıcaklık özelliklerini geleneksel metotlar, dinamik mekanik analizler (DMA) ve kırılgan eğme reometresi kullanarak araştırmışlardır. Elde edilen

sonuçlardan her üç yöntemde de SBS'in bağlayıcı parametrelerini olumlu yönde etkilediği belirlenmiştir (Lu ve Isacsson, 1998).

Mesut Tığdemir ve Ş. Figen Kalyoncuoğlu (2005), SBS katkılı asfalt betonu karışımlarında plastik deformasyon davranışını incelemişlerdir. Antalya-Alanya Yolu 1. Kısım Aşınma Tabakası Dizaynı'na uygun olarak hazırlanan asfalt betonu numuneleri için dinamik plastik deformasyon deneyleri yapılarak SBS polimer ilavesinin plastik deformasyona olan etkileri incelenmiştir.

Polimer yüzdesine bağlı olarak plastik deformasyon direncinde bir artış olduğu yani plastik deformasyon değerinin azaldığı görülmüştür. Polimer bulunmayan kontrol numuneleri için ortalama değerler dikkate alındığında 3600 yük tekrarı sonunda 200 mikron civarında plastik deformasyonlar gözlenmiştir. Bitümün %2 SBS polimer ilavesi ile modifikasyonundan elde edilen asfalt betonu numunelerinde plastik deformasyon değerlerinde %22'lik bir azalma olurken polimer yüzdesinin %3.5'e çıkması durumunda bu değerde daha da büyümüş ve %34'lere çıkmıştır. Yani bitümün SBS polimeri ile modifiye edilmesi numunelerin plastik deformasyon direncini artırarak onların daha az deforme olmalarını sağlamıştır. Bitümün modifiye edilmesi ile penetrasyon değeri azalmakta ve yumuşama noktası değeri artmaktadır. Bu şekilde bitüm modifikasyonu ile özellikle Antalya gibi sıcak bölgelerde görülen aşırı sıcaklardan asfalt betonunun kolayca deforme olması ve sonucunda güvenlik ve konfor açısından istenmeyen tekerlek izi oluşumu gibi bozulmaların oluşmasının önüne geçilebilir (Tığdemir ve Kalyoncuoğlu, 2005).

Mehmet Yılmaz ve Baha Vural Kök (2008), bitüm modifikasyonunda kullanılan stiren-butadien-stiren (SBS) katkı maddesinin bitümlü bağlayıcının yüksek sıcaklık performansına ve işlenebilirliğine etkisini araştırmışlardır. Üç farklı oranda (%2, 4 ve 6) SBS, 100/150 penetrasyonlu bitüme ilave edilerek modifiye bağlayıcılar elde edilmiştir. Saf ve modifiye bağlayıcılar, dönel viskozimetre deneyine tabi tutularak karışımların sıkıştırma ve karıştırma sıcaklıkları tespit edilmiştir. Saf ve modifiye bağlayıcılar dönel ince film halinde ısıtma deney yöntemi ile yaşlandırılmıştır. Bağlayıcılara yaşlandırma işleminden önce ve sonra DSR deneyi uygulanarak bağlayıcıların Superpave sistemine göre yüksek sıcaklık performans seviyeleri belirlenmiştir.

RV deney sonuçlarından, SBS oranı arttıkça bağlayıcı rijitliklerinin arttığı dolayısıyla işlenebilirliğin azaldığı belirlenmiştir. Buna rağmen %6 SBS kullanılması durumunda dahi RV deneyi için sınır değer olan 3000 cP değerinin aşılmadığı bu nedenle bütün bağlayıcıların işlenebilirlik açısından uygun olduğu tespit edilmiştir. DSR

sonuçlarından artan SBS içeriği ile tekerlek izine karşı dayanımın arttığı belirlenmiştir. Yaşlandırılmadan önce ve sonra saf bitümün 64°C'de, %2 ve %4 SBS içeren bağlayıcının 70°C'de ve %6 SBS içeren modifiye bitümün 82°C sıcaklıkta Superpave şartnamelerini sağladığı tespit edilmiştir. %2 ve %4 SBS içeren bağlayıcıların yüksek sıcaklık performansları aynı çıkmasına karşın %4 SBS içeren bağlayıcının $G^*/\sin\delta$ değeri %2 SBS modifiyeli bağlayıcının sahip olduğu değerden yüksek çıkmıştır. Faz açısı değerlerinden, sıcaklık artışı ile faz açısının arttığı, bağlayıcılardaki SBS oranının artmasıyla ise düştüğü belirlenmiştir. Bu sonuçlardan sıcaklık artışı ile bağlayıcıların daha fazla viskoz özellik göstereceği, SBS kullanılması sonucu ise yüksek sıcaklıklarda daha fazla elastik davranış gösterecekleri söylenebilmektedir. Sonuç olarak bitüm modifikasyonunda SBS kullanılması durumunda işlenebilirlik açısından bitümün pompalanması ve agregayla karıştırılması sırasında daha fazla enerji ve süre gerekse dahi tekerlek izi oluşumuna karşı dayanım ve yüksek sıcaklıklarda elastiklik bakımından avantaj sağlanacağı düşünülmektedir. Ülkemiz açısından değerlendirildiği takdirde tekerlek izi oluşumunun başlıca problem olduğu özellikle sıcak iklimli bölgelerde SBS kullanımı bağlayıcıdan kaynaklanan bozulmaların engellenmesine yardımcı olacak dolayısıyla maliyeti yüksek bakım ya da yeniden yapımların geciktirilmesini sağlayabilecektir (Yılmaz ve Kök, 2008).

Kumar ve ekibi (2008), yapmış oldukları çalışmada SBS ve düşük yoğunluklu polietilen'in (LDPE) bitümlü bağlayıcı ve karışımların performansı üzerindeki etkilerini incelemiştir. Deney sonuçlarından her iki katkı maddesinin kalıcı deformasyona karşı dayanımı arttırdığı belirlenmiştir (Kumar ve diğ., 2008).

3.2. Bitümlü Sıcak Karışımlarda Uçucu Kül Kullanımı

Uçucu kül en yaygın puzzolandır. Bu malzeme, kömür yakan enerji santrallerinde öğütülmüş kömürün yanmasıyla ortaya çıkan bir atık maddedir. Baca gazları atmosfere bırakılmadan önce bu gazlar içindeki ince tanelerin toz toplama sistemi tarafından toplanmasıyla elde edilir. Uçucu kül rutubetli ortamlarda kalsiyum iyonları ile reaksiyona girerek yarı kararlı alümin silikatlar içerir. Dünyadaki uçucu kül üretimi yılda yaklaşık 450 milyon tondur, ancak toplam uçucu kül miktarının sadece % 6'sı çimento ve beton karışımlarında puzolan olarak kullanılmaktadır. Türkiye' de kömür yakan 11 enerji santrali bulunmaktadır. Ülkemizde yıllık uçucu kül üretimi yaklaşık 15 milyon ton civarındadır ancak bunun az bir miktarı değerlendirilebilmektedir. Büyük hacimlerde ortaya çıkan ve

bir yan ürün olan uçucu külün değerlendirilmesi, ekonomi ve çevre kirliliği açısından önemlidir. Uçucu külün değerlendirilmesi hem diğer malzemelerden tasarruf sağlayacak, hem de fabrika alanlarının dökme sahası olarak kullanılmalarını önleyecektir.

Uçucu kül toz halinde veya öğütülmüş taş kömürü ile yakıldığı zaman kül bırakan yüksek özelliklerde linyit kömürlerinin, kazanlarda yanması sonucunda meydana gelen ve baca gazları ile sürüklenen, çok ince silis ve alümino-silisli bir yanma kalıntısıdır (TS 639, 1975).

Uçucu küller camsal, içi boşluklu veya dolu küresel tanecikler ile süngerimsi mineral parçacıklar ve yanmamış taneciklerden meydana gelir. Termik santralin tipine göre 1100-1600°C sıcaklıkta yakılan kömürlerin % 10-20' si kazan altına düşerek su ile uzaklaştırılır. Buna kazan altı cürufu denir. Bunların tane çapları 20 mikron- 3 mm arasındadır. Geri kalan daha ince partiküller baca çekimi ile taşınarak siklon veya elektrofiltrelerde toplanırlar. Bu uçucu küller, baca gazları ile sürüklenir ve hava ile temas ederek ani soğuma ile puzzolanik özellik kazanırlar. Puzzolan; içinde silisli ve alüminli bileşikler bulunan tek başına bağlayıcı olmayan ancak su ve kireçle birleştiğinde bağlayıcılık özelliği kazanan malzemelerdir. Uçucu kül, bir suni puzzolandır.

ASTM-C 618'e göre uçucu kül, iki ana kategoriye ayrılmaktadır. Bunlar F ve C tipidir. F tipi uçucu kül genellikle %10 dan daha az CaO içerir. Buna karşın C tipi uçucu kül, %15 ten %35' e kadar CaO içerir. Diğer yandan F tipi uçucu kül antrasit ve bitümlü kömürün yanmasından üretilir, bu da düşük kireçli uçucu kül olarak sınıflandırılır. C tipi uçucu kül ise diğer linyit ve bitümlü olmayan kömürün yanmasından elde edilir. Yüksek kalsiyum içeriğine bağlı olarak C tipi uçucu küller puzzolanik özelliklerinin yanında bağlayıcı özelliğe de sahiptir.

Uçucu külün özellikleri; yakılan kömüre, yakma ve külü toplama metodu gibi faktörlere bağlı olarak her termik santral için hatta aynı santral için bile farklılıklar gösterir. Ancak, genel olarak uçucu kül, çimentodan daha koyu renkte, çok ufak taneli, elle dokunulduğunda yumuşak bir malzemedir. Renginin koyuluğu açıklığı elde edildiği kömüre ve yanma özelliğine bağlıdır. Linyit kömüründen elde edilen uçucu küller daha esmerdir. Tane çapları 1-150 mikron arasındadır. Uçucu kül içindeki boşluk oranı, iri uçucu küllerde %20'ye çıkmaktadır. Özgül ağırlık 2.10-2.40 g/cm³ arasında değişmektedir. Uçucu külün inceliği SiO₂ miktarı ile birlikte puzzolanik aktivite özelliğine etkiyen en önemli faktördür. Bu özellik ayrıca harcın işlenebilmesine de etki eder (Alataş, 1996).

3.2.1. Uçucu Külün Kullanıldığı Yerler

Uçucu külün çok geniş bir kullanım alanı vardır, bunlardan bazıları şunlardır:

- Çimento ve betonda katkı maddesi olarak,
- Boşluklu beton üretiminde,
- Tuğla üretiminde,
- Boşluk doldurma-enjeksiyon işlerinde,
- Hafif agrega üretiminde,
- Karayolları ve havalimanları inşaatlarında,
- Gazbeton üretiminde,
- Rolkrit üretiminde kullanılmaktadır.

Betonda uçucu kül kullanımının iki ana nedeni vardır:

- Beton maliyetlerini düşürmek,
- Taze ve sertleşmiş betonun özelliklerini iyileştirmek.

Uçucu küllerin ekonomik olarak değerlendirilmesi, kullanılabilir miktarda, gerekli nakliye miktarına ve istenilen tasarıma bağlıdır. Uçucu kül hidratasyon ısını düşürür ve tanelerin küreselliği sayesinde taze betonun kararlılığını, kolay yerleşmesini ve kolay sıkıştırılmasını sağlar. Uçucu külün kimyasal bileşimi, tane boyut dağılımı, inceliği, puzolanik aktivitesi ve betonun kür koşulları, uçucu küllü betonun mekanik özelliklerini etkileyen önemli etkenlerdir. Betonda uçucu kül kullanımının erken yaşlarda yavaş dayanım kazanmasına yol açtığı iyi bilinmektedir. Beton teknolojisindeki son gelişmelerden, kalsiyum içeriği ve tane boyut dağılımının dayanım kazanma hızını belirleyen en önemli parametreler olduğu anlaşılmaktadır. Porsuk barajı inşaatında uçucu kül kullanılmasına ilişkin çalışmada Tunçbilek uçucu külü kullanılmış ve % 25-30 oranında uçucu kül katılmasının kütle betonlarında hidratasyon ısını düşürdüğü ve betonun nihai dayanımının katkısız betona kıyasla daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Uçucu küllerin yoğunlukları düşük olduğundan, betonda yoğunluk azalmasına sebep olurlar.

Boşluklu beton, çimento ya da kireç ile uçucu kül karışımından hava ya da daha başka bir gaz geçirilerek elde edilmektedir. Yoğunluğu normal betonun 1/5'i ile 1/3'ü arasındadır. Uçucu kül belirli oranda su ile karıştırılarak istenilen irilikte, doğal agregaya göre daha hafif bir malzeme elde edilebilmektedir. Bu şekilde elde edilen agregalarla yapılan betonlar daha dayanıklı olmakta ve hafif olmaktadır.

Uçucu küller tuğla üretiminde 17. yüzyıldan beri hammadde olarak kullanılmaktadır. Uçucu kül ile elde edilen gazbeton, hafif ve ısı iletkenliği düşük olduğundan yapılarda kullanılması duvar kalınlıklarını azaltır. Böylece binaların toplam ağırlığı azalır. Uçucu kül ile üretilen gazbeton kuvars ile üretilen gazbetondan daha dayanıklıdır (Alataş, 1996).

Uçucu kül, Rolkrit (Silindir ile sıkıştırılmış beton) üretiminde de kullanılır. Çok düşük çimento dozajları ile üretilen bu betonlar hiç çökme vermeyen ve titreşimli yol silindirlerini taşıyabilecek kadar kuru ve bu araçlarla sıkıştırıldıklarında alt tabakalara yapışacak kadar nemlenen betonlardır. Bunların taşınmasında ve serilmesinde de yol yapım araçları olan damperler ve dozerler kullanılır.

Wasti, (1990), uçucu küllerin geoteknik özelliklerini (indeks, kompaksiyon, kayma mukavemeti ve sıkışabilirlik) incelemiş, uçucu küllerin toprak dolgu malzemesi yerine ve yüksek plastisiteli killerin iyileştirilmesinde kullanılarak değerlendirilebileceği sonucuna varmıştır (Wasti, 1990).

Karayolu üstyapısı inşaatlarında asfalt karışımlarda uçucu külün filler yerine kullanılması fikri yeni değildir. Birçok bilim adamı yaptıkları çeşitli araştırmalarla asfalt betonunda uçucu kül kullanarak olumlu sonuçlar elde etmişlerdir:

Carpenter (1952), F sınıfı uçucu kül kullanarak asfalt betonu numuneleri hazırlamış ve suda bekletilmiş bu numuneler üzerinde yapılan basınç deneylerinden olumlu sonuçlar elde etmiştir (Carpenter, 1952).

Werden ve arkadaşları (1952), asfalt karışımların, karıştırma, yerleştirme ve sıkıştırma durumlarında ve stabilite, su hasarına dayanıklılık ve esneklik konularında, uçucu külün filler olarak uygun bir malzeme olduğunu belirtmişlerdir (Werden ve diğ., 1952).

Swaminathan ve Nair (1968), Hindistan'da filler olarak uçucu kül kullanıp asfalt yol inşa ettiler. İki yıl boyunca yaptıkları gözlemlerde asfalt kaplamanın günlük 5000 araçlık trafik yüküne karşı dayanım gösterebildiğini belirttiler (Swaminathan ve Nair, 1968).

Zimmer (1970)'in yaptığı analizlerin sonuçları, uçucu kül kullanarak hazırlanan asfalt karışım numuneleri, suda bekletildikten sonra daha yüksek dayanım kazandıklarını göstermiştir (Zimmer, 1970).

Sankaran ve Rao (1973), uçucu kül ve bunun gibi filler olarak kullanılabilen kil ve taş tozunu karşılaştırmışlardır. Bu çalışmaların sonucunda, % 2 uçucu külün diğerlerine göre en yüksek stabiliteyi sağladığını belirtmişlerdir (Sankaran ve Rao, 1973).

Henning (1974), Carpenter' in araştırmasından farklı olarak, C sınıfı uçucu külün asfalt karışımlarının özelliklerine etkisini araştırmıştır. Çalışmasında, %4 uçucu kül ilavesiyle, daha yüksek stabilite ve akma ve daha düşük hava boşluğu elde etmiştir. Ayrıca Henning, numunelerde uçucu külün kullanılmasıyla, suda bekletilen numunelerin stabilitelerinde artış sağladığını belirtmiştir (Henning, 1974).

Rosner ve arkadaşları (1982), uçucu külü asfalt betonu karışımlarda filler olarak ve soyulmayı önleme amacıyla kullandılar. Uçucu kül kullanılan numunelerin dayanımının arttığını tespit ettiler (Rosner ve diğ., 1982).

Tons ve arkadaşları (1983), bitümlü karışımlarda F sınıfı uçucu külün kullanımını araştırmışlardır. Hazırlanan numuneler üzerinde, nem hasarına dayanım, termal çatlak, tekerlek izi, yorulma deneyleri yapılmıştır. Bu deneylerden olumlu sonuçlar elde edilmiştir (Tons ve diğ., 1983).

Suheibani (1986), bir çalışmasında uçucu külün asfaltın özelliklerini geliştirdiğini tespit etmiştir. Yaptığı analizlerde uçucu kül taneciklerinin asfalt karışımlarının viskozitesini nasıl etkilediğini ve yoğunluk, hava boşluğu ve diğerk mekanik özelliklerini incelemiştir. İndirekt çekme, kayma ve esneklik modülü test sonuçları, ilave edilen F sınıfı uçucu külün, yorulma çatlak derinliği ve çekme dayanımı özelliklerini geliştirdiğini göstermiştir (Suheibani, 1986).

Cabrera ve Zoorob (1994), uçucu külün filler olarak kullanıldığı karışımlarda, karıştırma sıcaklığının 110° C ve sıkıştırma sıcaklığının da 85° C olması gerektiğini belirlemişlerdir (Cabrera ve Zoorob, 1994).

Cabrera ve Zoorob (1995), sıcak karışım asfaltta filler olarak uçucu külün kullanımının, karışım hazırlanmasında ve yerleştirilmesinde gerekli olan enerji ihtiyacını azalttığını belirtmişlerdir (Cabrera ve Zoorob, 1995).

Ali ve arkadaşları (1996), asfalt karışımlarda uçucu külü 0, %2, %4 ve %6 oranlarında kullandılar ve uçucu kül oranının artmasıyla karışımın esneklik modülünün ve ITS değerlerinin arttığını tespit ettiler (Ali ve diğ., 1996).

Kavussi ve Hicks (1997), yaptıkları çalışmada asfalt karışımlarda filler yerine kireç, çimento, kuvars, uçucu kül ve kaolin kullanmışlar, asfalt karışımın viskozitesinin fillerin dane boyutu ile ilgili olduğunu ve ince dane boyutunun daha yüksek viskozite değeri verdiğini belirlemişlerdir (Kavussi ve Hicks, 1997).

Asi ve Assaad (2005), mineral fillerin %10'u yerine uçucu kül kullandığında, asfalt karışımların yorulma ömürlerinde belirli bir artış olduğunu rapor etmişlerdir (Asi ve Assaad, 2005).

Kumar ve arkadaşları (2008), yaptıkları çalışmada filler olarak uçucu kül kullanıldığında, uçucu kül oranının artmasıyla asfalt karışımının indirekt çekme dayanımının, düşük sıcaklık ve yorulma çatlaklarına karşı dayanımın arttığını belirtmişlerdir (Kumar ve diğ., 2008).

Serkan Tapkın (2008), uçucu külün filler olarak kullanımı sonucu, bitümlü sıcak karışımların mekanik özelliklerinin değişimini incelemiştir. Deneyisel çalışmalarda kalker bazlı agrega kullanılmıştır. Bitüm ise 60/70 penetrasyonludur. Modifiye edilmiş olan karışımların hazırlanmasında üç tip uçucu kül Soma (F tipi), Çayırhan (F tipi) ve Kangal (C tipi), kireç ve portland çimentosu kullanılmıştır. Bu modifikasyon ağırlık bazında yapılmıştır. Soma uçucu külü kullanılarak yürütülen çalışmalar sonucunda Marshall stabilite değerlerinde önemli artışlar, akma değerlerinde ise önemli azalmalar görülmüştür. Ayrıca yapılan daha etraflı analizler sonucu da bitümden %30 ekonomi sağlandığı görülmüştür. Soma uçucu külü numunelerinin averaj stabilite değerleri, kalker bazlı filler ile hazırlanan numunelerden %11 daha yüksek, averaj akma değerleri ise %17 daha düşüktür. Ayrıca Soma uçucu külü numunelerinin averaj hava boşluğu oranları kontrol numunelerinden %53 daha fazladır. Son olarak Soma uçucu külü numunelerinin averaj özgül ağırlık değerleri kontrol numunelerinden %4 daha düşüktür.

Bu sonuçların sebepleri şu şekilde sıralanabilir:

1) Soma uçucu külü (F tipi) üç tip uçucu kül içerisinde en kaba gradasyona haizdir. Bu sebepten dolayı filler-bitüm etkileşimi sayesinde hissedilen "sertleşme etkisi" bu numunelerde daha fazla hissedilmektedir.

2) Alüminyum oksit yüzdesi (Al_2O_3) Soma uçucu külü kimyasal kompozisyonuna göre %27.64'dür Bu diğer uçucu küllerin Al_2O_3 yüzdesinin iki katından fazladır. Bitüm ile uçucu kül arasındaki bağdan alüminyum oksit yüzdesi sorumlu olduğundan Marshall numuneleri daha yüksek dayanıma ve rijitliğe sahiptir.

Optimum bitüm muhtevası olan %5 değeri kullanılarak ve 6 değişik filler malzemesi ile hazırlanan (her bir tip filler için 3'er adet) Marshall numuneleri UMATTA test düzeneği ile tekrarlı yorulma deneylerine tabi tutulmuştur. Bu testler inkübatör ünitesi içerisinde yorulma çatlakları oluşumunu tetikleyici bir sıcaklık olarak kabul edilebilecek 40°C'da gerçekleştirilmiştir. Poisson oranı karakteristik bir değer olarak 0.35 alınmıştır. Her yük

tekrarında maksimum 1000 N kuvvet, 500 ms vuruş süresi, 100 ms maksimum yüke ulaşma süresi uygulanmıştır. Bu parametreler, 6 tip değişik filler ile hazırlanmış bitümlü sıcak karışımların kritik sıcaklıklarda ve yavaş seyreden ağır taşıt trafiği altında yorulma davranışlarını göreceli olarak laboratuvar test ortamında mukayese etmek üzere seçilmiştir. Soma uçucu külü ile hazırlanan numunelerin ilk elastik birim deformasyonlarının kontrol numunelerinden %97.4 oranında düşük olduğu gözlemlenmiştir. Soma tipi numunelerin maksimum ortalama elastik birim deformasyonları da kontrol numunelerinden %26.8 daha az çıkmıştır. Bu da Soma tipi numunelerin çok daha uzun yorulma ömürlerinin sebebini açıklamaktadır. Ayrıca Soma tipi numunelerin son elastik birim deformasyon değerleri de kontrol numunelerinden % 5.6 daha az bulunmuştur. Tüm analizler ışığında Soma tipi numunelerin yorulma ömürleri kontrol numuneleri ile karşılaştırıldığında ortalama olarak %34 daha fazla çıkmıştır (Tapkın, 2008; Tapkın, 2009).

Sharma ve arkadaşları (2010), Hindistan'ın 14 değişik termik santralinden uçucu küller toplayarak, bunlar üzerinde değişik deneyler ve analizler yapmışlardır. Sonra uçucu külleri bitümlü karışımlarda kullanışlardır. Yaptıkları çalışmalar sonucunda, uçucu küllerin hepsinin de uygun olduğu ve uçucu külün filler olarak optimum oranının % 7 olduğunu belirtmişlerdir (Sharma ve diğ., 2010).

3.3. Bitümlü Sıcak Karışımlarda Diğer Katkıların Kullanımı

M. Garcia-Morales ve arkadaşları (2003), geri dönüştürülmüş EVA (etilen vinil asetat) modifiyeli asfalt bağlayıcıların viskoz özelliklerini ve içyapılarını incelemişlerdir. Numunelere % 0-9 arasında değişen miktarlarda EVA ilavesi yapılmış, böylece bitümlü kaplamanın servis özellikleri iyileşmiş, % 9 EVA modifiyeli bitümün ısı duyarlılığının azalması ile birlikte viskozitesindeki en tesirli azalışın 90°C'de oluşması asfalt kaplamanın karıştırma, serme ve sıkıştırma süreçlerini kolaylaştırmıştır (Garcia-Morales ve diğ., 2003).

Smail Haddadi ve arkadaşları (2008), EVA modifiyeli bağlayıcıların kaplama performanslarını araştırmışlardır. EVA modifikasyonu ile birlikte yumuşama noktasında önemli bir artış, penetrasyonda ise azalma görülmüştür. Asfalt bağlayıcının özelliklerini iyileştiren optimum EVA oranı % 5 olarak bulunmuştur (Haddadi ve diğ., 2008).

Hadidy ve Tau (2009), pyrolysis polypropylene (PP) modifiyeli taş mastik asfaltın kaplama performanslarını incelemişlerdir. PP ilavesiyle bağlayıcının yumuşama noktası artma eğilimi göstermiştir bu da kaplamadaki deformasyon direncini arttırmıştır ve

bağlayıcının ısı duyarlılığını azaltmıştır. Marshall stabilite testi, indirekt çekme direnci testi ve basınç direnci testleri sonucunda % 5 oranında PP ilavesinin taş mastik asfaltın dren olma miktarının azalmasında etkili olduğu, çekme direncini % 85 oranlarında arttırdığı esnek kaplamanın daha yüksek dayanıklılığa sahip ve daha ekonomik olduğu görülmüştür (Hadidy ve Tan, 2009). Ün Uşar ve Ahmet Tuncan (2007), polipropilen fiber katkılı yoğun bitümlü karışımların tekrarlı sünme deneyindeki reolojik davranışlarını incelemişlerdir. Karışımlara optimum olarak belirlenen M-03 tipi polipropilenin katılması stabilite değerlerini %20 civarında arttırmıştır. Bu da bitümlü sıcak karışımlara % 3 oranında katkı katmanın kaplamaların stabilitesini artıracak ve dolayısıyla servis ömrünün uzayacağını göstermektedir (Uşar, 2007).

Sait Barış Ertekin (2003), bitümlü bağlayıcıyı (asfalt çimentosu), polimerlerin bir sınıfı olan polyolefinlerin, düşük yoğunluklu polietilenler (LDPE) alt grubuna ait bir katkı ile modifiye etmiş ve elde edilen polimer modifiye bitümün (PMB) çeşitli özelliklerindeki değişimleri saptanmaya çalışmıştır. Uzun karıştırma süreleri seçilmesi durumunda, modifikasyonun daha başarılı olduğu ve bitümün penetrasyon, yumuşama noktası ve düktilite özelliklerinin olumlu yönde değiştiği gözlemlenmiştir (Ertekin, 2003),

Hasan Erhan Yücel (2007), polifiber kullanımının asfalt karışım özellikleri üzerindeki etkisini araştırmıştır. Elde edilen test sonuçlarına göre, polifiber ilavesiyle katkılı asfalt karışımlarının stabilite ve akma gibi özellikleri üzerinde bazı iyileşmeler gözlenmiştir (Yücel, 2007).

Sinan Hınıslioğlu ve Emine Ağar (2004), yüksek yoğunluklu polietilenin içeren, çeşitli atık plastik maddelerin asfalt karışımlarında modifiyer olarak kullanılabilme ihtimallerini araştırmışlardır. Yüksek yoğunluklu polietilen modifiyeli asfalt karışımlarının kaplamalardaki kalıcı deformasyonlara karşı kaplamanın direncini arttırdığı ve atık plastiklerin sirkülasyonuna katkı sağladığı belirtilmiştir (Hınıslioğlu ve Ağar, 2004).

Meltem Çubuk, Metin Gürü ve M. Kürşat Çubuk (2009), epoksi reçine modifiyeli asfalt bağlayıcıların performans özelliklerini incelemişlerdir. Superpave testleri sonucunda yaşlandırılmamış modifiyeli bitümde tekerlek izi oluşumu % 22, yaşlandırılmış modifiyeli bitümde tekerlek izi oluşumu % 29 oranlarında azalmıştır. Yorulma çatlaklarında % 27 oranlarında azalma görülmüştür (Çubuk ve diğ., 2009).

Perviz Ahmedzade, Mehmet Yılmaz ve Mesude Yılmaz (2007), epoksi reçine (ER) ile modifiye edilen bitümlerin fiziksel özellikleri üzerinde kısa süreli yaşlanmanın etkilerini incelemişlerdir. Düktilite, penetrasyon, yumuşama noktası ve Fraas kırılma

noktası deney sonuçlarından yola çıkarak % 0.75 - % 1.0 - % 2,0 oranında epoksi reçine kullanılması durumunda saf bağlayıcının elastikiyetinin artacağı, B 70/100 saf bitümünün kullanılması düşünülen uygulamalarda özellikle % 2.0 ER modifiyeli bağlayıcısının kullanılması durumunda düşük ısı çatlakları ve elastikiyet nedeniyle yorulma çatlakları açısından avantaj sağlanacağı düşünülmektedir (Ahmedzade ve diğ., 2007).

Al-Khateeb ve Al-Akhras (2011), Superpave deneyleri yaparak portland çimentosu ile modifiye edilmiş asfalt bağlayıcının özelliklerini incelemişlerdir. Kompleks kayma modülü (G^*) ilave portland çimento oranının artmasıyla birlikte artış göstermiştir. Dönel viskozimetreyi ve dinamik kayma reometresinin tekerlek izi oluşma parametresi olan $G^*/\sin\delta$ 'yı dengeli bir şekilde arttıran optimum portland çimentosu oranı 0.15 bulunmuştur (Al-Khateeb ve Al-Akhras, 2011).

Y. Edwards, Y. Tasdemir ve U. Isacsson (2006), ticari mumlar ve politosforik asit ile modifiye edilmiş 160/220 penetrasyon derecesindeki bitümün orta ve yüksek sıcaklıklardaki reolojik davranışını incelemişlerdir. Modifiye bitüme penetrasyon, yumuşama noktası, Fraass kırılma noktası, dinamik kayma reometrisi, diferansiyel taramalı kalorimetri ve kuvvet düktilometrisi testleri yapılmıştır. Katkı maddesi olarak sasobit (S), montan mumu (MW), polietilen mum (PW) ve politosforik asit (PPA) kullanılarak hazırlanan numunelerin bir kısmı dönel ince film etüvü ve basınçlı yaşlandırma kabı deneyleri ile yaşlandırılmıştır. Yüksek sıcaklıklarda, polietilen mum ve politosforik asit ile modifiye edilmiş bitüm numunelerinin kompleks kayma modülü, sasobit ve montan mumu ile modifiye edilmiş bitüm numunelerinden daha büyük değerler almıştır (Edwards, Taşdemir ve Isacsson, 2007).

Alex K. Apeagyei (2010), antioksidanların asfalt bağlayıcıların yaşlanması üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Katkı maddesi olarak sönmüş kireç, siyah karbon, DLTPD (Dilauryi Thiodipropionate)/furfural, gibi antioksidanlar kullanılmıştır.

DLTPD/furfural katkılı asfalt bağlayıcının kısa süreli yaşlanmasında kontrol numunesine göre % 40 azalma görülmüştür. Modifiye asfalt bağlayıcının uzun süreli yaşlanmasında da benzer oranlarda azalma olmuştur. DLTPD/furfural katkılı asfalt bağlayıcı yüksek sıcaklıklarda daha sert, düşük sıcaklıklarda daha yumuşak davranış göstermiştir. DLTPD/furfural katkılı asfalt bağlayıcıda, daha önce başka antioksidanlar kullanılarak yapılan çalışmalarda görülen aşırı yumuşama olayı görülmemiştir (Apeagyei, 2010).

Mei-zhu Chen ve arkadaşları (2010), geri dönüşmüş tuğla tozunun asfalt karışımlarda filler alternatifi olarak kullanımını araştırmışlardır. Geri dönüşmüş tuğla tozu katkısının 60°C’de hem statik hem de dinamik sünme testiyle ölçülen kalıcı deformasyonu azaltarak yüksek sıcaklıklarda asfalt karışımının tekerlek izi oluşturma direncini arttırmıştır. Deneysel çalışmalar sonucunda geri dönüşmüş tuğla tozunun asfalt karışımlarda mineral filler olarak kullanılmasının uygun olduğu görülmüştür (Mei-zhu ve diğ., 2010). Murat Karacasu ve Bekir Çakar (2009), atık tuğla kırıklarının, asfalt betonu özelliklerine etkisini incelemişlerdir. Karışımlara agrega ağırlığının % 25 ve % 50'si oranlarında atık tuğla kırıkları eklenmiştir. Atık oranı arttıkça, pratik özgül ağırlık azalmakta, boşluk oranı artmakta, bitümle dolu boşluk oranı azalmakta, Marshall dayanımı azalmakta ve akma miktarı artmaktadır. Elde edilen sonuçlar atık tuğla kırıklarının yüksek dayanımların istenmediği, yol inşaatlarında kullanılabileceğini göstermektedir (Karacasu ve Çakar, 2009).

Yongjie Xue ve arkadaşları (2008), yakılmış kentsel katı atık küllerinin taş mastik asfalt kaplamalarda ince agrega veya filler olarak kullanımını araştırmışlardır. Doğal kayaçları korumak ve katı atıkların yeniden kullanımı için bazik oksijen fırın cürufu, kaba agrega yerine kullanılmıştır. Marshall ve Superpave karışım yöntemine göre hazırlanan numunelerin deney sonuçları, % 8-16 oranında yakılmış kentsel katı atık küllerinin taş mastik asfalt kaplamalarda ince agrega veya filler yerine kullanımının mümkün olduğunu göstermiştir (Xue ve diğ., 2008).

Mahmoud Ameri ve arkadaşları (2010), İran doğal bitümünün (gilsonit) asfalt bağlayıcılarda katkı maddesi olarak kullanımını araştırmışlardır. Doğal bitüm % 4, 8 ve 12 oranlarında PG58-22 ve PG64-22 asfalt bağlayıcılara ilave edilmiştir. PG58-22 ve PG64-22 bitümlerine %4 oranında doğal bitüm ilavesinin yüksek sıcaklıklardaki $G^*/\sin\delta$ değerini önemli ölçüde arttırdığı görülmüştür ve bu artış eğilimi doğal bitüm oranının % 8 ve % 12 oranlarında arttığı zamana kadar devam etmiştir (Ameri ve diğ., 2010).

Serdal Terzi (2000), mermerlerin düzgün geometrik şekil alabilmesi için kesilmesi esnasında ortaya çıkan mermer tozu atıklarının asfalt betonunda filler malzemesi olarak kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Sonuç olarak, özellikle mermer tozunun yaygın olarak bulunduğu bölgelerde, taşıma ve kurutma maliyetlerinin taş tozu filler maliyetini geçmediği kesimlerde, asfalt betonu karışımlarda taş tozu yerine mermer tozunun filler malzemesi olarak kullanılabileceği kanaatine varılmıştır (Terzi, 2000).

Mehmet Yılmaz (2005), katkı maddesi olarak kullanılan polyester reçinenin (PR) bitüm ve bitümlü sıcak karışımlar üzerindeki etkileri araştırmıştır. Bağlayıcı üzerinde yapılan deneyler sonucunda, AC 75/100 bitümüne % 0.75 oranında polyester reçine katılarak elde edilen PR katkılı bağlayıcının, elde edildiği bağlayıcının penetrasyonunu arttırdığı, yumuşama noktasını ve özgül ağırlığını azalttığı, Fraas kırılma noktasını ise yükselttiği belirlenmiştir (Yılmaz, 2005).

Celeddin Ensar Şengül (2006), asfalt kaplamalarda, tekerlek izi oluşumu ve su etkisiyle oluşan hasarların azaltılması için sönmüş kirecin modifiyer olarak kullanımını araştırmışlardır. Sönmüş kireç ilavesinin, bitüm ile agrega arasındaki adezyonu artırarak kaplamanın tekerlek izi oluşumuna ve suya karşı direncini arttırdığı görülmüştür (Şengül, 2006).

Altan Yılmaz ve İlhan Sutaş (2005), elektrik-ark fırınlarından proses sonucu ortaya çıkan atık cürufların (Ferrokrom Cürufu) yol üstyapısının kaplama tabakalarında filler olarak kullanımını teknik yönden incelemişlerdir. Yapılan çalışmalar sonucunda, FeCr cürufu'nun bitümlü sıcak karışımlarda filler olarak % 5-10 arasındaki oranlarda kullanılabileceği belirlenmiştir (Yılmaz ve Sutaş, 2005).

Deniz ve arkadaşları (2011), kullanılmış otomobil lastiklerinin bitümlü sıcak karışım performansına etkilerini incelemişlerdir. Granül (0-5 mm) hale getirilen lastik parçacıkları farklı oranlarda (% 2.0, %1.0, % 0.7 ve % 0.5) bitümlü sıcak karışıma katılarak, farklı sıcaklıklarda dolaylı çekme, statik sünme, tekrarlı sünme ve Marshall stabilite deneylerine tabi tutulmuştur. Elde edilen veriler ışığında "Kullanılmış Otomobil Lastikleri" nin bitümlü sıcak karışıma katılabilecek uygun oranın % 0,5 olduğu söylenebilir. Kullanılmış otomobil lastik katkılı karışımların (BSK) soğuk iklimlerin hakim olduğu bölgelerde düşük ısı çatlaklarına ve tekerlek izine karşı direnç konusunda olumlu etki yapacağı anlaşılmıştır (Deniz ve diğ., 2011).

Taşçı (2010), piroliz edilmiş atık yağ ile modifiye edilmiş bitümlü bağlayıcının reolojik özelliklerini araştırmışlardır. Bu amaçla katkısız 50/70 pen. bitüm numunesinin ve ağırlıkça % 3 , % 6, % 9 oranlardaki atık lastik yağı katkılı modifiye bitümlere yumuşama noktası, penetrasyon deneyleri yapılmıştır. Marshall deneyi sonuçlarına bakıldığında atık lastik yağı stabiliteyi orijinal bitüme göre düşürmüştür. Özellikle % 4 oranındaki katkılı bitüm hem stabilite hem de akma değerleri olarak şartnameyi sağlamaktadır. Ayrıca akma değerinin küçük olması kaplamanın plastik deformasyonlara olan direncini artırmaktadır (Taşçı, 2010).

Murat Karacasu ve Şafak Bilgiç (2009), atık lastik katkısının sıcak asfalt özelliklerine etkisini incelemişlerdir. Sert plastik parçacıkları (SPP), araç lastiği parçacıkları (ALP) ve lastik tozu (LT) katılarak hazırlanan numuneler için atık oranı arttıkça, pratik özgül ağırlık azalmaktadır, boşluk oranı artmaktadır, bitümle dolu boşluk oranı azalmaktadır, marshall dayanımı azalmaktadır, akma miktarı artmaktadır (Karacasu ve Bilgiç, 2009).

Geçkil (2008), siyah karbonun (SK) bitümlü sıcak karışımların performans özelliklerine etkisini Superpave dizayn yöntemi ile araştırmıştır. SK ilavesiyle, karışımların adezyon ve kohezyon özelliklerinin iyileştiğini, sertlik ve durabilitesinin arttığını, sudan kaynaklanan bozulmalara karşı direncinin önemli ölçüde yükseldiğini belirlemiştir. Bitüm ve karışım modifikasyonu ile ilgili yapılan deneysel çalışmaların sonucunda; Siyah karbonun bir katkı maddesi olarak karışımlarda %10–15 oranında kullanılması durumunda, bitüm ve dolayısıyla bitümlü sıcak karışımların fiziksel ve mekanik özelliklerini iyileştirmesi sebebiyle, sıcaklık hassasiyetinin düştüğü, sertliğinin artmasına rağmen esneklik özelliğinin arttığı, agrega–asfalt adezyonu ve asfaltın kohezyonunun artış gösterdiği, su hasarlarına karşı büyük direnç sağlandığı, kaplama yorulma direncinin yükseldiği ve özellikle yüksek sıcaklıklarda kalıcı deformasyonlara karşı büyük direnç oluştuğu görülmüştür (Geçkil, 2008).

Tuncan (1997), otomobil lastiği, plastik (polietilen), kül, petrollü sondaj atığı ve mermer tozu gibi endüstriyel atıkların asfalt beton kaplama karışımları üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Bu çalışmanın sonuçları, lastik ve plastik ilave edilen asfalt beton kaplama karışımlarının tokluk ve elastiklik özelliklerinin iyileştiğini göstermektedir. Bu şekilde, lastik ve plastik ilave edilen asfalt beton kaplamalar çatlamalardan korunmaktadır (Tuncan, 1997).

Fatma Nur Üstümkol ve Ayşe Turabi (2010), farklı özelliklere sahip endüstriyel atıkların (mermer tozu, uçucu kül, fosfoalçı ve cam tozu) asfalt betonu aşınma tabakasındaki fiziksel ve mekanik etkilerini araştırmışlardır. Deney sonuçları endüstriyel atık filler malzemelerin bitümlü sıcak karışımlarda taş tozu filler yerine % 7 oranında kullanılabileceğini göstermektedir (Üstümkol ve Turabi, 2010).

Çalışıcı (2009), metalik ve polimerik katkılarla modifiye edilmiş bitümlü bağlayıcıların kısa dönem yaşlanmaya karşı direncini araştırmışlardır. Katkı maddeleri olarak organik esaslı çinko (Zn), kalsiyum (Ca), magnezyum (Mg), bor (B), çinko fosfat (ZnPO₄) ve mangan (Mn) metal grubu katkılar olarak ve sentezlenen dietilen glikol esaslı

polibor bileşiğı ile trietilen glikol esaslı polibor bileşiğı ise polimer grubu katkıları olarak kullanılmıştır. Deneysel çalışmalar sonucunda, tüm katkıların denenen tüm oranlarında bitümlü bağlayıcının yaşlanmaya direncinin arttığı belirlenmiştir (Çalışıcı, 2009).

Eren (2008), petrol kökenli bir maden olan asfaltitin filler malzemesi olarak sıcak karışım asfalt betonunda kullanılabilirliğini incelemiştir. Bu çalışma sonucunda elde edilen bulgulardan, asfaltitin, asfalt betonu karışımlarında bütünüyle mineral filler olarak kullanılması yerine belli bir miktar kullanılmasının karışım performansı açısından daha iyi sonuçlar verebileceğini belirlemiştir (Eren, 2008).

Sönmez ve arkadaşları, Polimerler, Trinidad göl asfaltı ve gilsoniti de içeren sekiz farklı katkı maddesini BSK'larda denemiştir. Çalışmada Trinidad göl asfaltı, bitüm oranının % 24'ü kadar kullanılırken gilsonit bitüm oranının %10'u oranında kullanılmıştır. Çalışmada BSK numuneleri üzerinde Marshall stabilite deneyi, indirekt çekme dayanımı, indirekt çekme rijitlik modülü, statik ve tekrarlı sünme deneyi ve tekerlek izi deneyleri yapılmıştır. Sonuçta gilsonit, elvaloy ve olexobitin olumlu yönde fayda sağladığı belirlenmiştir. Trinidad göl asfaltı ise kullanılan katkılar içerisinde orta sıralarda yer almıştır (Sönmez ve diğ., 2005).

Hamidi, bitüm modifikasyonunda gilsonit kullanmış, gilsonitin bitümlü bağlayıcının penetrasyonunu azalttığını ve yumuşama noktasını arttırdığını belirlemiştir. % 4 ve % 8 gilsonit ile hazırlanan modifiye bağlayıcılar içeren karışımlar üzerinde uygulanan Marshall stabilite ve tekerlek izine karşı dayanım deneyleri ile gilsonit kullanımının BSK'ların stabilitesini ve tekerlek izine karşı dayanımlarını önemli oranda arttırdığı belirlenmiştir. İndirekt çekme rijitlik modülü deneyleri sonucunda katkı maddesi olarak gilsonit kullanımının 25°C sıcaklıkta rijitliği önemli oranda arttırmasına rağmen 35°C ve 45°C sıcaklıkta gilsonitin önemli bir etkisi görülmediği belirlenmiştir (Hamidi, 1998).

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

4.1. Bağlayıcılar Üzerinde Uygulanan Deney Sonuçları

Çalışmada öncelikle TÛPRAŞ rafinesinden temin edilen B 160/220 penetrasyon sınıfına ait TS EN 12591 standardına göre kullanılabilirliği belirlenmiştir. Bitümlü bağlayıcıların ısıya karşı duyarlılığını tespit etmek amacıyla Penetrasyon İndeksi (PI) kullanılmaktadır. Penetrasyon İndeksi, standart penetrasyon ve yumuşama noktası deney sonuçları kullanılarak belirlenmektedir (Formül 4.1–4.2). Formüldeki P_{25} , bitümün 25°C’deki penetrasyon değerini, T_{YN} ise yumuşama noktasını göstermektedir. Bitümlü bağlayıcıların ısıya karşı duyarlılıkları arttıkça PI değerleri azalmaktadır. Penetrasyon İndeksi’nin -2’den küçük olması bitümün ısıya çok duyarlı olduğunu, +2’den büyük olması ise ısıya karşı az duyarlı olduğunu göstermektedir (Ulliditz, 1987).

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

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

B 160/220 penetrasyon sınıfına ait bağlayıcıya uygulanan deneylerden elde edilen sonuçlar Tablo 4.1’de verilmiştir. Deneyler sonucunda bitümlü bağlayıcının şartname kriterlerini sağladığı belirlenmiştir.

Tablo 4.1. Saf bağlayıcının deney sonuçları

Özellikler	Standart	B 160/220	
		Sonuç	Şartname limiti
Penetrasyon (0.1 mm), 100 g, 5 s	ASTM D5	183	160-220
Yumuşama noktası (°C)	ASTM D36	41.7	35 – 43
Penetrasyon indeksi (PI)	-	0.28	-
RTFOT Sonrası			
Kütle kaybı (%)	ASTM D2872	0.872	mak. 1.0
Penetrasyon (0.1 mm), 100 g, 5 s	ASTM D5	89	-
Kalıcı penetrasyon, (%)	-	49	min. 37
Yumuşama noktası (°C)	ASTM D36	50.5	min. 37
Yumuşama noktasındaki artış (°C)	-	8.8	mak. 11
Penetrasyon indeksi (PI)	-	0.45	-

Çalışmada Shell firması tarafından üretilen Kraton D1101 sınıfı SBS kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan SBS'in özellikleri Tablo 4.2'de verilmiştir. Modifiye bağlayıcıları hazırlamak için, bitüm ve bitüme belirlenmiş oranlarda ilave edilen SBS 180°C sıcaklıkta, 1000 rpm. hıza sahip bir karıştırıcıda, 60 dakika süreyle karıştırılmıştır. Şekil 4.1'de görülen IKA marka karıştırıcı ile dört kollu karıştırma aparatı kullanılarak modifiye bağlayıcılar hazırlanmıştır. Önceden yapılan çalışmalarda saf bitümün özelliklerini önemli miktarda iyileştirebilmek için SBS'in bitüm ağırlığının %2-7'si aralığında kullanılması gerektiği belirtilmiştir (Nejad ve diğ., 2010). Bu nedenle çalışmada, tavsiye edilen üst sınır (%6) ve bu değerin yarısı (%3) SBS içeriği olarak belirlenmiştir.

Tablo 4.2. KRATON D 1101 Polimerinin özellikleri

Bileşim	Kraton D 1101
Moleküler yapı	Doğrusal
Styrene/Kauçuk oranı	31/69
Özgül ağırlık	0.94
Kopma noktasındaki çekme dayanımı (MPa)	31.8
Shore sertliği (A)	71
Fiziksel biçim	Gözenekli toz
Erime noktası	< 1
Uzama (%)	880



Şekil 4.1. Modifiye bağlayıcı hazırlama cihazı ve karıştırma aparatı

Bitümlü bağlayıcılarda oluşan kısa dönem yaşlanmayı temsil etmesi amacıyla bütün bağlayıcılar RTFOT deneyine tabi tutulmuştur. RTFOT deneyinde, 163°C sıcaklığa sahip etüve yerleştirilen 8 adet şişe yatay eksen etrafında 75 dakika süresince dakikada 15 devir yapacak şekilde döndürülmüştür. Modifiye bağlayıcılara uygulanan deneylerden elde edilen değerler Tablo 4.3’de verilmiştir.

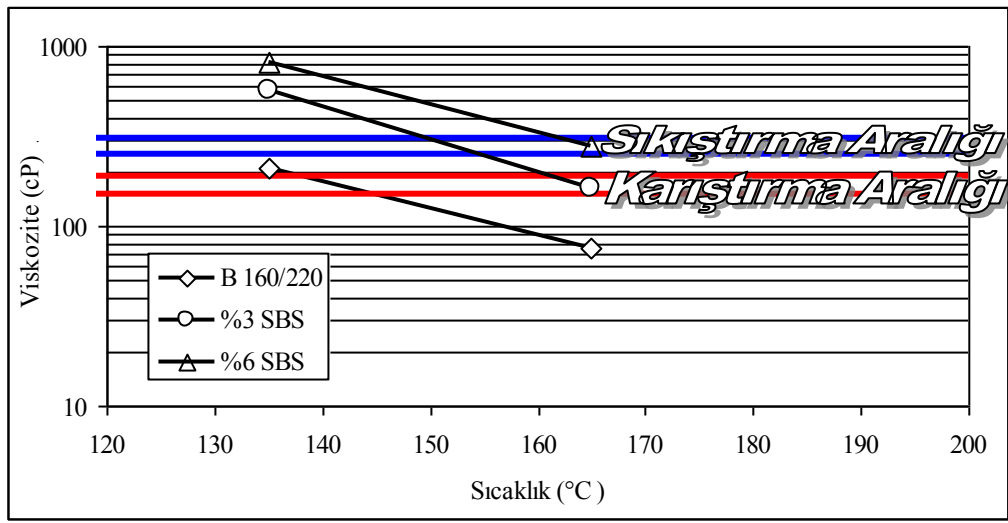
Tablo 4.3. Modifiye bağlayıcı deney sonuçları

Özellikler	Standart	B 160/220	MB _{%3SBS}	MB _{%6SBS}
Penetrasyon (0.1 mm), 100 g, 5 s	ASTM D5	183	112	76
Yumuşama noktası (°C)	ASTM D36	41.7	54.8	63.5
Penetrasyon indeksi (PI)	-	0.28	2.33	2.89
RTFOT Sonrası				
Kütle kaybı (%)	ASTM D2872	0.872	0.683	0.569
Penetrasyon (0.1 mm), 100 g, 5 s	ASTM D5	89	73	53
Kalıcı penetrasyon, (%)	-	49	65	70
Yumuşama noktası (°C)	ASTM D36	50.5	60.9	67.2
Yumuşama noktasındaki artış (°C)	-	8.8	6.1	3.7
Penetrasyon indeksi (PI)	-	0.45	2.25	2.52

Tablo 4.3’de görüldüğü üzere SBS içeriği arttıkça penetrasyon değerlerinin azaldığı, yumuşama noktası ve penetrasyon indeksi değerlerinin arttığı belirlenmiştir. SBS içeriği arttıkça kütle kaybı değerleri azalmış dolayısıyla kısa dönem yaşlanmanın etkisi azalmıştır. RTFOT öncesinde olduğu gibi sonrasında da SBS içeriği arttıkça penetrasyon değerleri azalmış, yumuşama noktası ve penetrasyon indeksi değerleri ise artmıştır. Kütle kaybındaki azalma gibi, kalıcı penetrasyonda meydana gelen artışın SBS içeriği ile artması, yumuşama noktasındaki artışın ise azalması SBS kullanımının kısa dönem yaşlanmanın etkisini azalttığını göstermektedir.

Bitümlü sıcak karışımların (BSK) karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarını tespit etmek amacıyla saf (B 160/220), %3 ve %6 SBS modifiyeli yaşlandırılmamış bağlayıcılara 135°C ve 165°C sıcaklıklarda dönel viskozimetre deneyleri uygulanmıştır. Çizilen sıcaklık-viskozite grafiğinde viskozite değerleri işaretlenerek bu değerler bir doğru ile birleştirilmiştir. BSK’ların karıştırılmasında bitümlü bağlayıcının 170 ± 20 cP,

sıkıştırılmasında ise 280 ± 30 cP viskozite değerine sahip olması istenmektedir (Zaniewski ve Pumphrey, 2004). Bu viskozite değerlerine karşılık gelen sıcaklık değerleri karıştırma ve sıkıştırma sıcaklığı olarak alınmaktadır. Karıştırma ve sıkıştırma sıcaklık aralıklarını gösteren viskozite-sıcaklık grafiği Şekil 4.2’de verilmiştir. Viskozite deneylerinden elde edilen bütün sonuçlar Tablo 4.4’te verilmiştir. Elde edilen sonuçlardan bağlayıcının işlenebilirlik şartını sağladığı belirlenmiştir. Ayrıca SBS içeriği arttıkça bağlayıcıların viskozitesinin arttığı belirlenmiştir. Dolayısıyla gerekli karıştırma ve sıkıştırma sıcaklığı artmıştır.



Şekil 4.2. Bitümlü bağlayıcıların karıştırma ve sıkıştırma sıcaklık aralıkları

Tablo 4.4. Dönel viskozite deney sonuçları

	Standart	B 160/220	%3 SBS	%6 SBS
Viskozite (cP, 135°C)	ASTM D4402	212.5	562.5	825.0
Viskozite (cP, 165°C)	ASTM D4402	75.0	162.5	276.5
Karıştırma Sıcaklığı Aralığı (°C)	-	138.1–145.1	162.2–168.5	173.4–181.1
Sıkıştırma Sıcaklığı Aralığı (°C)	-	124.0–129.5	149.8–155.1	161.0–169.5

4.2. Agregalar Üzerinde Uygulanan Deney Sonuçları

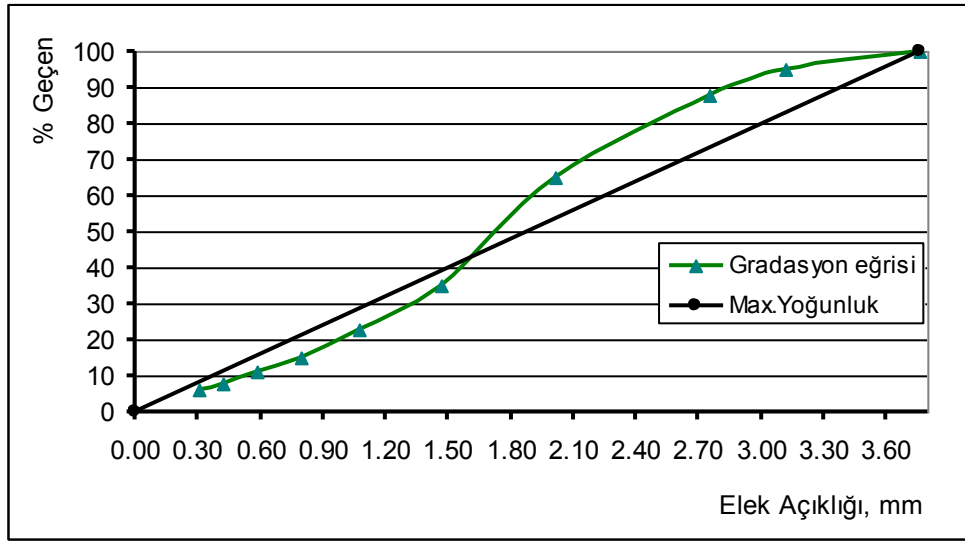
Çalışmada agregası olarak Elazığ Karayazı Bölgesi'nden temin edilen kalker (kireçtaşı) türü kırmataş malzemesi kullanılmıştır. Agregası karışımının No. 4 elek üzerinde kalan kaba kısmı yıkanarak tozdan arındırılmış bir şekilde deneylerde kullanılmıştır. Karışımlarda kullanılan kalker agregasının fiziksel özellikleri Tablo 4.5'te, kullanılan gradasyon ise Tablo 4.6'da ve Şekil 4.3'de verilmiştir.

Tablo 4.5. Çalışmada kullanılan agregaların fiziksel özellikleri

Özellikler	Standart	Şartname limitleri	Kaba	İnce	Filler
Dayanıklılık (Los Angeles Aşınma kaybı), (%)	ASTM C 131	max 30	29	-	-
Sağlamlık (Na ₂ SO ₄ ile Donma kaybı), (%)	ASTM C 88	max10	4.5	-	-
Yassı ve Uzun Daneler, (%)	ASTM D 4791	max 10	4		
Su absorpsiyonu (%)	ASTM C127	max 2	1.37		
Özgül ağırlık (g/cm ³)	ASTM C127		2.613	-	-
Özgül ağırlık (g/cm ³)	ASTM C128		-	2.622	-
Özgül ağırlık (g/cm ³)	ASTM D854		-	-	2.711

Tablo 4.6. Agregası gradasyonu

Elek boyutu (mm)	19.0	12.5	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
% Geçen	100	95	88	65	35	23	15	11	8	6



Şekil 4.3. Agregada gradasyonunun değişimi

Çalışmada Tunçbilek Termik Santraline ait F sınıfı uçucu kül kullanılmıştır. Uçucu külün gradasyonu incelenmiş ve tamamına yakınının No. 200 elekten geçtiği, dolayısıyla filler boyutunda olduğu tespit edilmiştir. Gradasyonda görüldüğü üzere filler oranı %6 olarak seçilmiştir. Uçucu külün bitümlü sıcak karışımların mühendislik özellikleri üzerindeki etkisini daha geniş bir aralıkta değerlendirmek amacıyla uçucu külün üç farklı oranda kullanımı düşünülmüştür. Uçucu kül No.200 elekten elenmiş ve agregada ağırlığının %2'si, %4'ü ve %6'sı oranlarında filler olarak kullanılmıştır. Karışımlarda uçucu kül oranı kadar kalker türü filler malzemesi yerine uçucu kül kullanılmıştır. Dolayısıyla bütün karışımların gradasyonunun filler dışında aynı olması sağlanmıştır. F sınıfı Tunçbilek uçucu külüne ait özellikler Tablo 4.7'de verilmiştir.

Tablo 4.7. Uçucu külün kimyasal bileşimi ve fiziksel özellikleri

	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO ₃ (%)	KK (%)	ÖYA (cm ² /g)	ÖA (g/cm ³)
F sınıfı Uçucu Kül	58.82	19.65	10.67	2.18	3.92	0.48	0.91	3812	2.08
KK: Kızdırma kaybı ÖYA: Özgül yüzey alanı ÖA: Özgül ağırlık									

4.3. Karışımlar Üzerinde Uygulanan Deney Sonuçları

4.3.1. Karışımların Optimum Bitüm İçeriklerinin Belirlenmesi

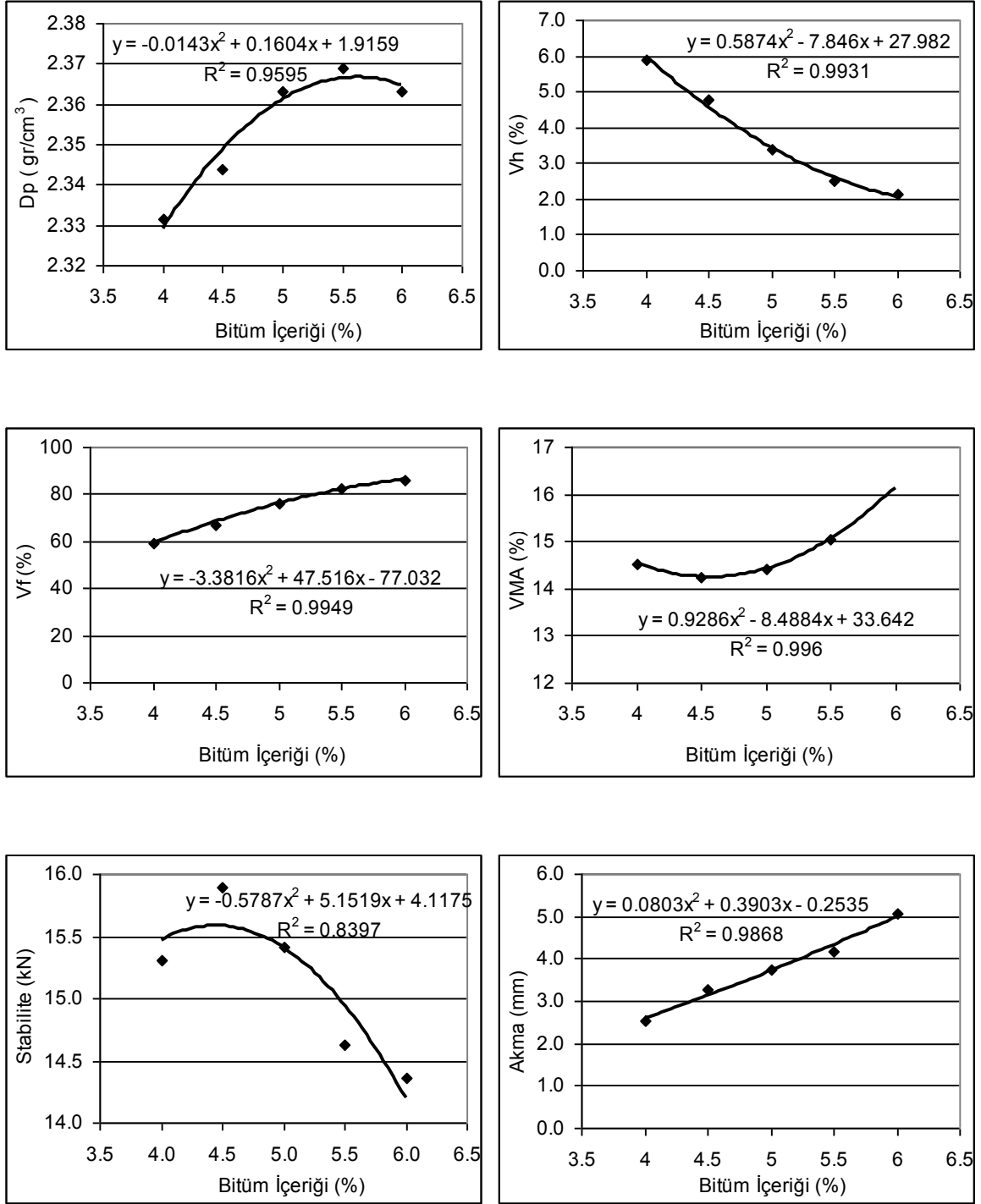
Çalışmada üç farklı bağlayıcı (B 160/220, B 160/220 + %3 SBS, B 160/220 + %6 SBS) dört farklı oranda uçucu kül (%0, %2, %4 ve %6) kullanılarak 12 farklı karışım değerlendirilmiştir. Her bir bağlayıcı ile uçucu kül içermeyen ve en yüksek oranda (%6) uçucu kül içeren karışımların optimum bitüm içerikleri bulunmuş diğer karışımların bitüm içerikleri ise oranlanarak belirlenmiştir. Her bir karışım için belirlenen veya hesaplanan optimum bitüm içeriklerinde üçer numune hazırlanarak elde edilen değerler şartname kriterleriyle karşılaştırılmıştır.

Karışımların hazırlanmasında bitümler, toplam agreg ağırlığının % 4,0 ; 4,5 ; 5,0 ; 5,5 ve 6,0'sı oranında kullanılmış ve her bir yüzde için üçer numune hazırlanmıştır. Bu numunelerin havadaki, sudaki ve doymuş kuru yüzey ağırlıkları alınarak Formül 2.7-2.8-2.9 ve 2.10'un yardımıyla hacim özgül ağırlıkları (D_p), boşluk oranları (V_h), agregalar arası boşluk oranları (VMA) ve asfaltla dolu boşluk oranları (V_f) belirlenmiştir. Daha sonra numuneler Marshall stabilite aletinde deneyerek stabilite ve akma değerleri belirlenmiştir. Bulunan bu değerler kullanılarak stabilite, D_p , V_h , VMA, V_f ve akma - % bitüm grafikleri çizilmiştir.

Tablo 4.8, B 160/220 bitümü kullanılan numunelerin sonuçlarını, Şekil 4.4 ise aynı bağlayıcının OBİ hesabında kullanılan grafiklerini göstermektedir.

Tablo 4.8. B 160/220 bitümü ile hazırlanan BSK numunelerinden elde edilen sonuçlar

Briket No:	Bitüm			Briket Yüksekliği (mm)				A (gr)	C (gr)	B (gr)	V (cm ³)	Dp (gr/cm ³)	D _t (gr/cm ³)	V _h (%)	V.M.A (%)	V _f (%)	Akma (mm)	Stab (kg)	Düz. Fak.	Düz. Stab
	W _a %	W _b %	gr	1	2	3	Ort													
1	4.0	3.85	48.0	66.6	66.3	66.8	66.6	1242.85	715.32	1247.13	531.81	2.337	2.478	5.91	14.57	59.45	2.12	1640	0.941	1543
2	4.0	3.85	48.0	66.7	67.2	67.1	67.0	1244.31	715.26	1249.53	534.27	2.329					2.57	1594	0.930	1483
3	4.0	3.85	48.0	67.3	66.9	66.6	66.9	1245.67	715.35	1250.45	535.10	2.328					2.89	1682	0.932	1567
ORTALAMALAR												2.331					2.53			1541
4	4.5	4.31	54.0	66.3	66.7	66.4	66.5	1249.35	722.28	1255.17	532.89	2.344	2.461	4.77	14.52	67.14	3.12	1620	0.943	1528
5	4.5	4.31	54.0	66.3	66.5	66.3	66.4	1251.44	723.65	1256.68	533.03	2.348					3.48	1688	0.946	1596
6	4.5	4.31	54.0	66.1	66.5	66.2	66.3	1251.96	722.67	1257.89	535.22	2.339					3.16	1734	0.948	1644
ORTALAMALAR												2.344					3.25			1589
7	5.0	4.76	60.0	66.4	66.0	65.9	66.1	1258.21	728.11	1259.73	531.62	2.367	2.445	3.36	14.24	76.37	3.28	1626	0.952	1548
8	5.0	4.76	60.0	66.1	66.1	66.4	66.2	1255.92	727.48	1259.82	532.34	2.359					3.88	1598	0.950	1518
9	5.0	4.76	60.0	66.0	66.2	66.1	66.1	1258.60	728.75	1261.39	532.64	2.363					4.01	1638	0.952	1560
ORTALAMALAR												2.363					3.72			1542
10	5.5	5.21	66.0	66.1	65.7	65.8	65.9	1263.81	732.44	1265.81	533.37	2.369	2.430	2.49	14.43	82.71	4.13	1568	0.958	1502
11	5.5	5.21	66.0	66.1	65.8	65.9	65.9	1264.10	733.01	1266.12	533.1	2.371					4.51	1488	0.956	1423
12	5.5	5.21	66.0	66.1	66.4	66.0	66.2	1263.09	732.17	1265.99	533.82	2.366					3.88	1540	0.950	1464
ORTALAMALAR												2.369					4.17			1463
13	6.0	5.66	72.0	66.1	65.8	65.4	65.8	1271.44	734.82	1271.93	537.11	2.367	2.414	2.12	15.04	85.92	4.88	1494	0.960	1435
14	6.0	5.66	72.0	66.0	65.6	65.5	65.7	1269.94	733.67	1271.35	537.68	2.362					5.12	1482	0.962	1426
15	6.0	5.66	72.0	65.7	65.9	65.7	65.8	1269.60	733.45	1271.38	537.93	2.360					5.15	1506	0.960	1446
ORTALAMALAR												2.363					5.05			1436

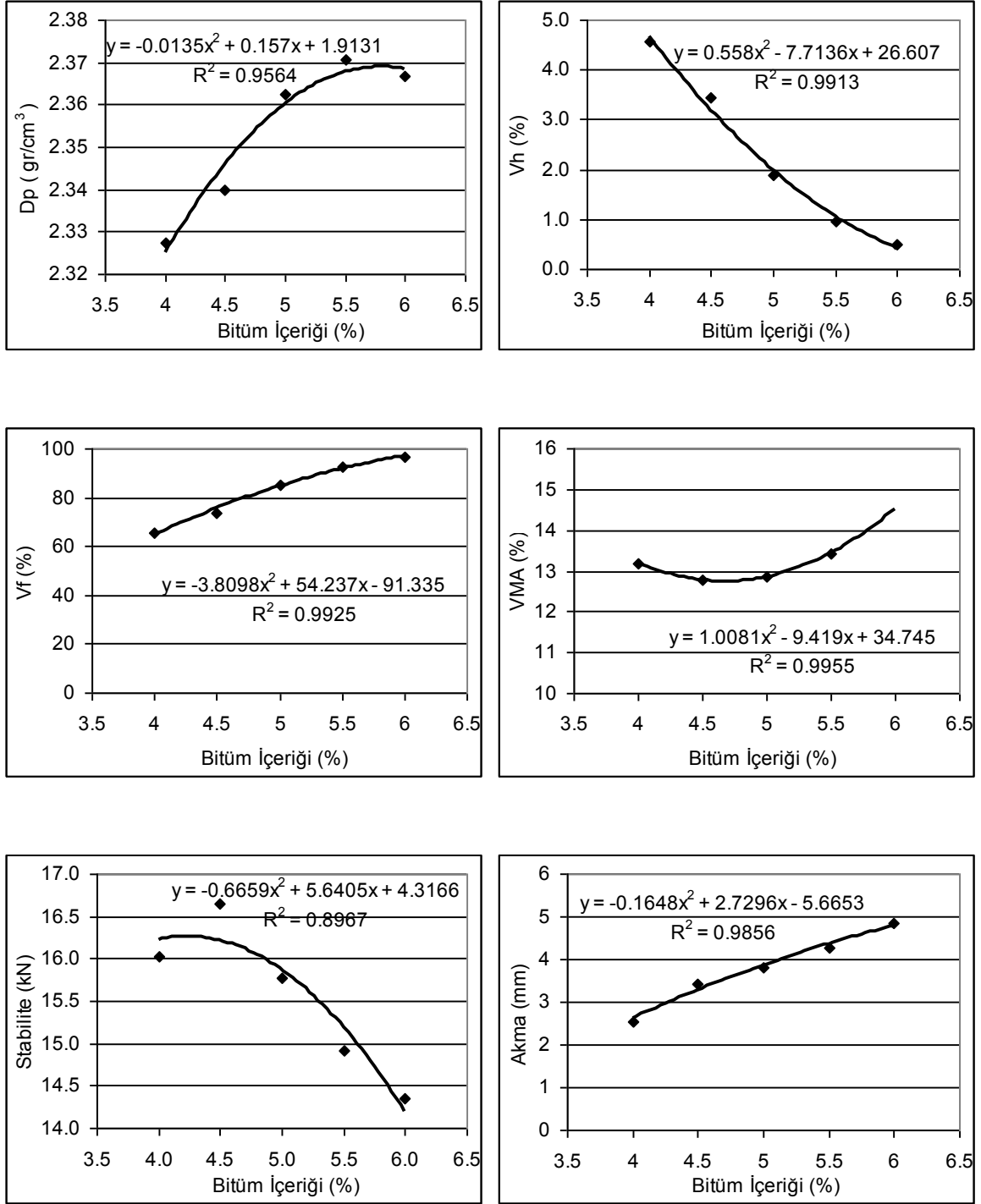


Şekil 4.4. B 160/220 bitümü ile hazırlanan numunelerin dizayn parametrelerinin bitüm içeriği ile değişimi

B 160/220 bitümü ve filler olarak %6 oranında uçucu kül kullanılan numunelerden elde edilen değerler Tablo 4.9’da, aynı karışımların OBİ hesabında kullanılan grafikleri ise Şekil 4.5’de verilmiştir.

Tablo 4.9. B 160/220 bitümü ve filler olarak %6 oranında uçucu kül içeren BSK numunelerinden elde edilen sonuçlar

Briket No:	Bitüm			Briket Yüksekliği mm				A gr	C gr	B gr	V cm ³	Dp gr/cm ³	D _t gr/cm ³	V _h %	V.M.A %	V _f %	Akma mm	Stab kg	Düz. Fak.	Düz. Stab
	W _a %	W _b %	gr	1	2	3	Ort													
1	4.0	3.85	48.0	66.8	66.6	66.7	66.7	1241.56	714.23	1248.66	534.43	2.323	2.439	4.57	13.22	65.41	2.34	1732	0.938	1624
2	4.0	3.85	48.0	66.6	66.6	66.6	66.6	1242.78	715.84	1248.13	532.29	2.335					2.61	1670	0.940	1570
3	4.0	3.85	48.0	66.8	66.5	66.7	66.7	1242.65	714.96	1249.52	534.56	2.325					2.69	1721	0.938	1615
ORTALAMALAR												2.328					2.55			1603
4	4.5	4.31	54.0	66.2	66.1	66.5	66.3	1248.69	721.81	1254.70	532.89	2.343	2.423	3.44	13.18	73.87	3.39	1780	0.948	1688
5	4.5	4.31	54.0	66.5	66.4	66.1	66.3	1246.88	722.26	1255.45	533.19	2.339					3.67	1696	0.946	1605
6	4.5	4.31	54.0	66.4	66.0	66.0	66.1	1251.34	722.18	1257.43	535.25	2.338					3.26	1788	0.951	1701
ORTALAMALAR												2.340					3.44			1665
7	5.0	4.76	60.0	65.9	66.4	66.2	66.2	1256.78	727.56	1258.97	531.41	2.365	2.408	1.89	12.76	85.19	3.80	1694	0.950	1610
8	5.0	4.76	60.0	66.1	66.1	65.8	66.0	1256.04	727.91	1259.41	531.5	2.363					3.66	1672	0.955	1596
9	5.0	4.76	60.0	65.8	66.1	66.3	66.1	1257.36	728.64	1261.62	532.98	2.359					3.97	1598	0.953	1523
ORTALAMALAR												2.362					3.81			1576
10	5.5	5.21	66.0	66.2	66.2	66.1	66.2	1262.47	731.07	1264.11	533.04	2.368	2.393	0.94	12.87	92.66	3.99	1528	0.950	1452
11	5.5	5.21	66.0	66.2	65.9	65.9	66.0	1264.67	732.86	1266.49	533.6	2.370					4.63	1560	0.955	1489
12	5.5	5.21	66.0	66	65.8	66.0	65.9	1264.21	732.90	1265.43	532.53	2.374					4.21	1602	0.956	1532
ORTALAMALAR												2.371					4.28			1491
13	6.0	5.66	72.0	65.7	65.7	65.8	65.7	1270.51	734.86	1271.49	536.63	2.368	2.378	0.49	13.43	96.37	4.87	1488	0.961	1430
14	6.0	5.66	72.0	66.1	66.2	65.6	66.0	1270.38	734.61	1271.35	536.74	2.367					4.55	1476	0.955	1410
15	6.0	5.66	72.0	65.9	65.6	65.9	65.8	1268.27	733.91	1270.10	536.19	2.365					5.08	1526	0.960	1464
ORTALAMALAR												2.367					4.83			1435

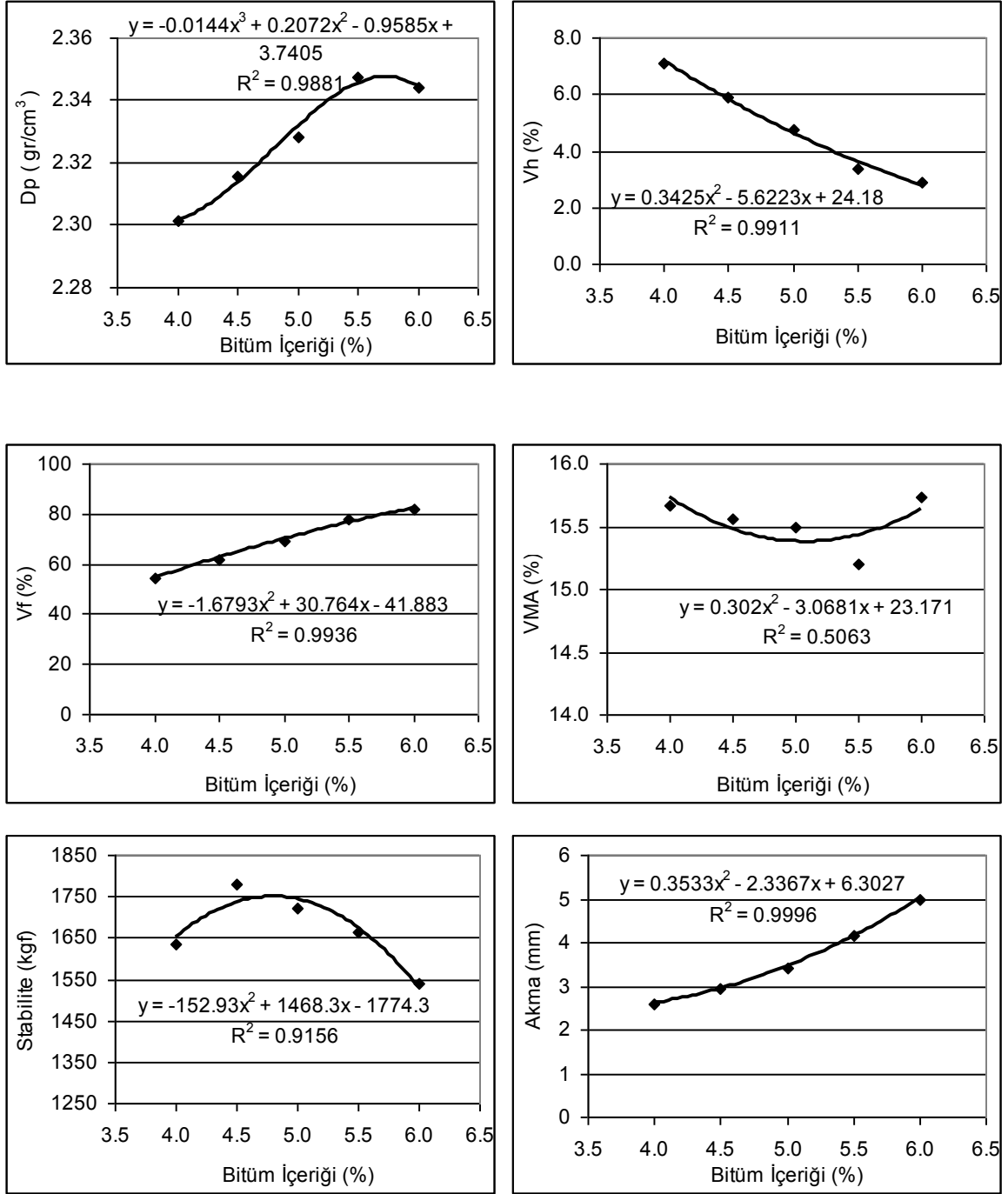


Şekil 4.5. B 160/220 bitümü ve filler yerine %6 oranında uçucu kül kullanılan numunelerin dizayn parametrelerinin bitüm içeriği ile değişimi

MB₃SBS bitümü ve filler olarak kalker kullanılan numunelerden elde edilen değerler Tablo 4.10'da, aynı karışımların OBİ hesabında kullanılan grafikleri ise Şekil 4.6'da verilmiştir.

Tablo 4.10. MB_{3SBS} modifiye bitümü ve filler olarak kalker kullanılan BSK numunelerinden elde edilen sonuçlar

Briket No:	Bitüm			Briket Yüksekliği mm				A gr	C gr	B gr	V cm ³	Dp gr/cm ³	D _t gr/cm ³	V _h %	V.M.A %	V _f %	Akma mm	Stab kg	Düz. Fak.	Düz. Stab
	W _a %	W _b %	gr	1	2	3	Ort													
1	4.0	3.85	48.0	67.6	66.8	67.3	67.2	1244.45	708.90	1250.21	541.31	2.299	2.477	7.10	15.67	54.68	2.38	1760	0.925	1627
2	4.0	3.85	48.0	67.2	67.0	66.7	67.0	1246.78	708.11	1249.97	541.86	2.301					2.75	1710	0.931	1592
3	4.0	3.85	48.0	67.1	67.1	67.6	67.3	1247.81	708.58	1250.16	541.58	2.304					2.69	1824	0.924	1685
ORTALAMALAR												2.301					2.61			1635
4	4.5	4.31	54.0	66.8	66.9	66.6	66.8	1251.78	712.90	1253.44	540.54	2.316	2.461	5.91	15.56	62.02	2.96	1888	0.936	1767
5	4.5	4.31	54.0	67.1	66.7	66.9	66.9	1253.07	712.94	1253.71	540.77	2.317					2.89	1926	0.933	1796
6	4.5	4.31	54.0	67.3	66.7	67.1	67.0	1250.49	711.55	1252.17	540.62	2.313					3.02	1904	0.929	1770
ORTALAMALAR												2.315					2.96			1778
7	5.0	4.76	60.0	66.6	66.6	66.2	66.5	1256.75	720.49	1260.41	539.92	2.328	2.445	4.76	15.49	69.30	3.45	1818	0.943	1715
8	5.0	4.76	60.0	66.6	66.9	66.7	66.7	1259.59	719.16	1259.83	540.67	2.330					3.71	1860	0.937	1742
9	5.0	4.76	60.0	66.4	66.9	67.0	66.8	1256.42	718.66	1258.37	539.71	2.328					3.12	1824	0.936	1707
ORTALAMALAR												2.328					3.43			1721
10	5.5	5.21	66.0	66.1	66.4	66.4	66.3	1261.46	726.77	1264.01	537.24	2.348	2.429	3.36	15.20	77.92	3.76	1720	0.947	1629
11	5.5	5.21	66.0	66.5	66.7	66.4	66.5	1264.03	727.40	1265.42	538.02	2.349					4.17	1778	0.942	1674
12	5.5	5.21	66.0	66.8	66.7	66.6	66.7	1263.82	726.22	1265.19	538.97	2.345					4.55	1800	0.938	1688
ORTALAMALAR												2.347					4.16			1664
13	6.0	5.66	72.0	66.3	66.5	66.4	66.4	1267.96	728.17	1269.50	541.33	2.342	2.414	2.89	15.73	81.65	4.88	1622	0.945	1532
14	6.0	5.66	72.0	66.6	66.6	66.5	66.6	1268.31	729.54	1270.76	541.22	2.343					4.96	1646	0.941	1548
15	6.0	5.66	72.0	66.7	66.3	66.4	66.5	1267.41	728.82	1269.05	540.23	2.346					5.15	1630	0.943	1537
ORTALAMALAR												2.344					5.00			1539

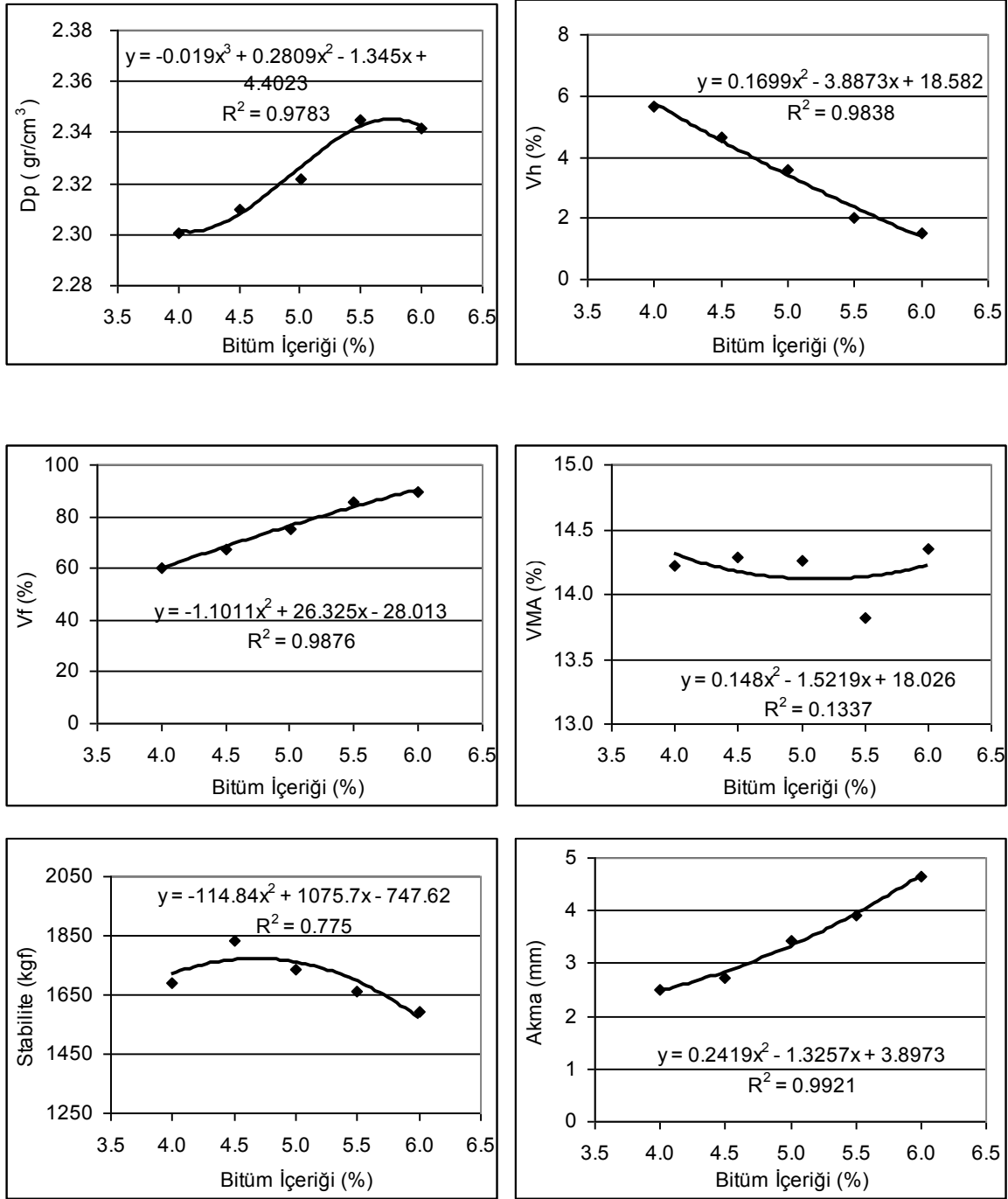


Şekil 4.6. MB₃SBS bitümü ve filler yerine kalker kullanılan numunelerin dizayn parametrelerinin bitüm içeriği ile değişimi

MB₃SBS bitümü ve filler olarak %6 oranında uçucu kül kullanılan numunelerden elde edilen değerler Tablo 4.11’de, aynı karışımların OBİ hesabında kullanılan grafikleri ise Şekil 4.7’de verilmiştir.

Tablo 4.11. MB_{%3SBS} modifiye bitümü ve filler olarak %6 oranında uçucu kül kullanılan BSK numunelerinden elde edilen sonuçlar

Briket No:	Bitüm			Briket Yüksekliği mm				A gr	C gr	B gr	V cm ³	Dp gr/cm ³	D _t gr/cm ³	V _h %	V.M.A %	V _f %	Akma mm	Stab kg	Düz. Fak.	Düz. Stab
	W _a %	W _b %	gr	1	2	3	Ort													
1	4.0	3.85	48.0	66.9	67.0	67.1	67.0	1243.76	710.43	1251.44	541.01	2.299	2.439	5.66	14.23	60.21	2.39	1827	0.930	1700
2	4.0	3.85	48.0	67.2	67.2	67.3	67.2	1242.39	710.34	1250.33	539.99	2.301					2.68	1836	0.925	1698
3	4.0	3.85	48.0	67.0	67.4	67.2	67.2	1244.21	709.06	1249.53	540.47	2.302					2.44	1804	0.925	1670
ORTALAMALAR												2.301					2.50			1689
4	4.5	4.31	54.0	66.5	66.6	66.7	66.6	1250.81	715.59	1256.49	540.9	2.312	2.423	4.65	14.28	67.42	2.79	1977	0.940	1858
5	4.5	4.31	54.0	66.8	66.9	66.5	66.7	1249.12	714.88	1255.47	540.59	2.311					2.61	1996	0.937	1870
6	4.5	4.31	54.0	67.1	66.9	66.6	66.9	1250.53	714.45	1256.46	542.01	2.307					2.76	1895	0.933	1769
ORTALAMALAR												2.310					2.72			1832
7	5.0	4.76	60.0	66.8	66.4	66.3	66.5	1256.78	719.23	1260.39	541.16	2.322	2.407	3.56	14.26	75.03	3.12	1812	0.942	1708
8	5.0	4.76	60.0	66.7	66.7	66.9	66.8	1255.99	720.44	1260.41	539.97	2.326					3.45	1906	0.936	1784
9	5.0	4.76	60.0	66.7	66.9	66.6	66.7	1256.38	718.40	1260.74	542.34	2.317					3.68	1836	0.937	1720
ORTALAMALAR												2.322					3.42			1737
10	5.5	5.21	66.0	66.5	66.8	66.9	66.7	1262.53	728.65	1266.48	537.83	2.347	2.392	1.99	13.82	85.61	3.45	1766	0.937	1654
11	5.5	5.21	66.0	66.2	66.4	66.5	66.4	1260.92	727.05	1264.58	537.53	2.346					3.98	1780	0.946	1683
12	5.5	5.21	66.0	66.1	66.2	66.5	66.3	1261.22	726.22	1264.95	538.73	2.341					4.27	1733	0.948	1643
ORTALAMALAR												2.345					3.90			1660
13	6.0	5.66	72.0	66.4	66.4	66.4	66.4	1268.69	729.17	1271.26	542.09	2.340	2.378	1.52	14.35	89.40	4.64	1650	0.945	1559
14	6.0	5.66	72.0	66.7	66.8	66.3	66.6	1269.11	730.55	1272.04	541.49	2.344					4.74	1704	0.940	1602
15	6.0	5.66	72.0	66.2	66.5	66.5	66.4	1268.90	728.27	1270.49	542.22	2.340					4.56	1714	0.945	1619
ORTALAMALAR												2.341					4.65			1593

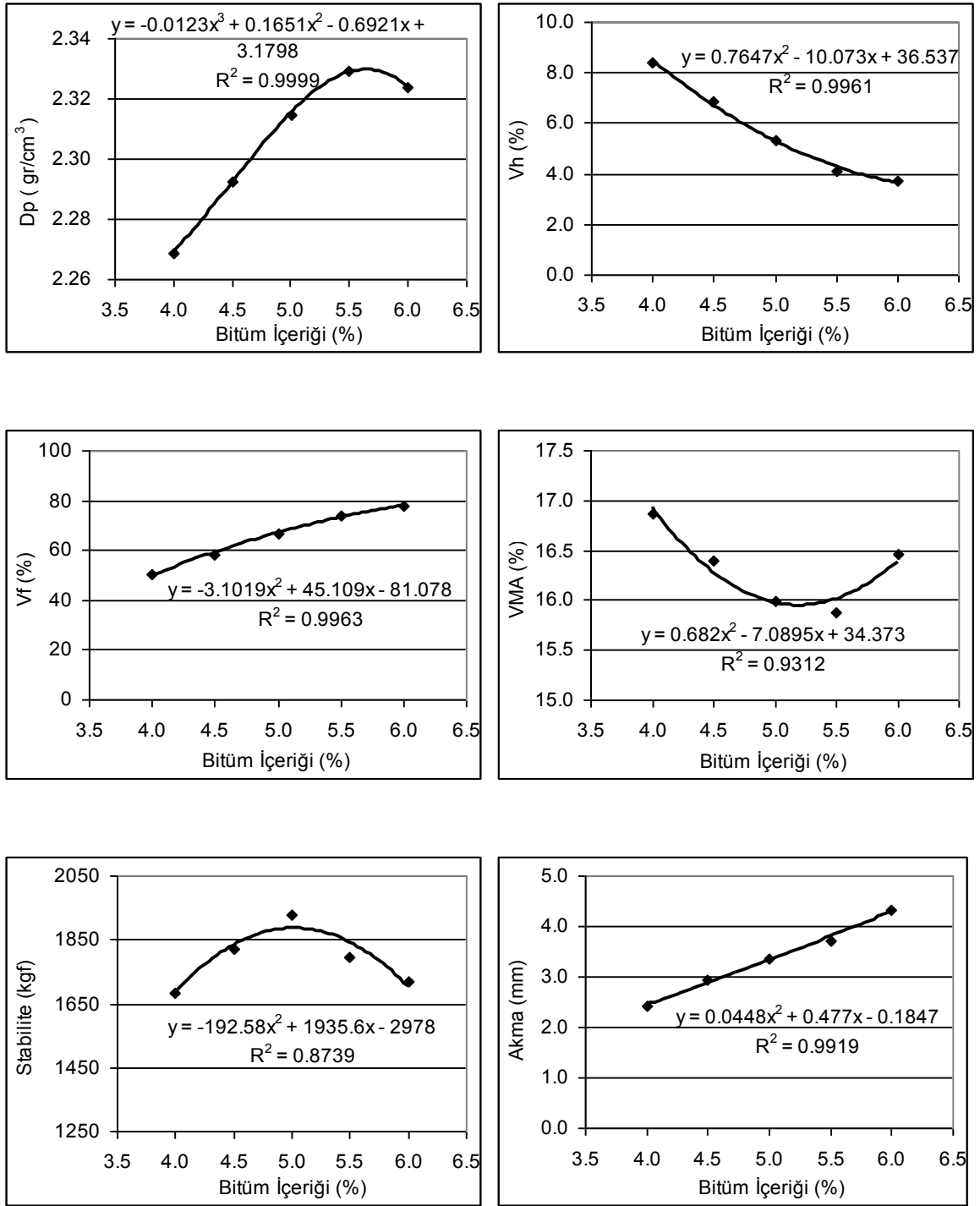


Şekil 4.7. MB₃SBS bitümü ve filler yerine %6 oranında uçucu kül kullanılan numunelerin dizayn parametrelerinin bitüm içeriği ile değişimi

MB₆SBS bitümü ve filler olarak kalker kullanılan numunelerden elde edilen değerler Tablo 4.12’de, aynı karışımların OBİ hesabında kullanılan grafikleri ise Şekil 4.8’de verilmiştir.

Tablo 4.12. MB_{6SBS} modifiye bitümü ve filler olarak kalker kullanılan BSK numunelerinden elde edilen sonuçlar

Briket No:	Bitüm			Briket Yüksekliği mm				A gr	C gr	B gr	V cm ³	Dp gr/cm ³	D _t gr/cm ³	V _h %	V.M.A %	V _f %	Akma mm	Stab kg	Düz. Fak.	Düz. Stab
	W _a %	W _b %	gr	1	2	3	Ort													
1	4.0	3.85	48.0	67.1	67.3	67.2	67.2	1241.76	700.65	1248.48	547.83	2.267	2.477	8.41	16.86	50.14	2.17	1883	0.925	1743
2	4.0	3.85	48.0	67.1	67.3	67.2	67.2	1242.19	701.36	1251.39	550.03	2.258					2.65	1794	0.925	1660
3	4.0	3.85	48.0	67.1	67.1	67.6	67.3	1241.38	703.53	1247.70	544.17	2.281					2.39	1775	0.924	1640
ORTALAMALAR												2.269					2.40			1681
4	4.5	4.31	54.0	66.8	67.1	67.2	67.0	1250.03	710.89	1256.16	545.27	2.292	2.461	6.84	16.40	58.31	2.75	1933	0.929	1797
5	4.5	4.31	54.0	67.1	66.9	66.7	66.9	1249.55	709.24	1255.15	545.91	2.289					2.84	1981	0.933	1848
6	4.5	4.31	54.0	67.0	67.1	67.1	67.1	1250.23	710.90	1255.57	544.67	2.295					3.21	1962	0.929	1822
ORTALAMALAR												2.292					2.93			1822
7	5.0	4.76	60.0	66.8	66.9	67.2	67.0	1255.29	718.37	1260.25	541.88	2.317	2.444	5.31	15.99	66.81	3.29	2072	0.931	1929
8	5.0	4.76	60.0	66.6	66.7	66.9	66.7	1254.43	717.17	1259.10	541.93	2.315					2.99	2016	0.937	1888
9	5.0	4.76	60.0	66.6	66.7	66.9	66.7	1255.95	718.09	1261.11	543.02	2.313					3.75	2105	0.937	1972
ORTALAMALAR												2.315					3.34			1930
10	5.5	5.21	66.0	66.5	66.3	66.4	66.4	1261.69	724.16	1265.59	541.43	2.330	2.429	4.11	15.87	74.13	3.28	1898	0.945	1793
11	5.5	5.21	66.0	66.6	66.8	66.5	66.6	1262.46	724.97	1266.72	541.75	2.330					3.66	1936	0.939	1818
12	5.5	5.21	66.0	66.8	66.3	66.4	66.5	1260.80	722.62	1264.61	541.99	2.326					4.15	1878	0.942	1770
ORTALAMALAR												2.329					3.70			1794
13	6.0	5.66	72.0	66.2	66.4	66.3	66.3	1266.68	724.36	1269.60	545.24	2.323	2.413	3.71	16.45	77.46	4.33	1804	0.947	1709
14	6.0	5.66	72.0	66.5	66.4	66.2	66.4	1267.23	724.71	1270.62	545.91	2.321					3.96	1792	0.946	1695
15	6.0	5.66	72.0	66.1	66.2	66.0	66.1	1265.57	724.29	1268.20	543.91	2.327					4.71	1844	0.952	1756
ORTALAMALAR												2.324					4.33			1720

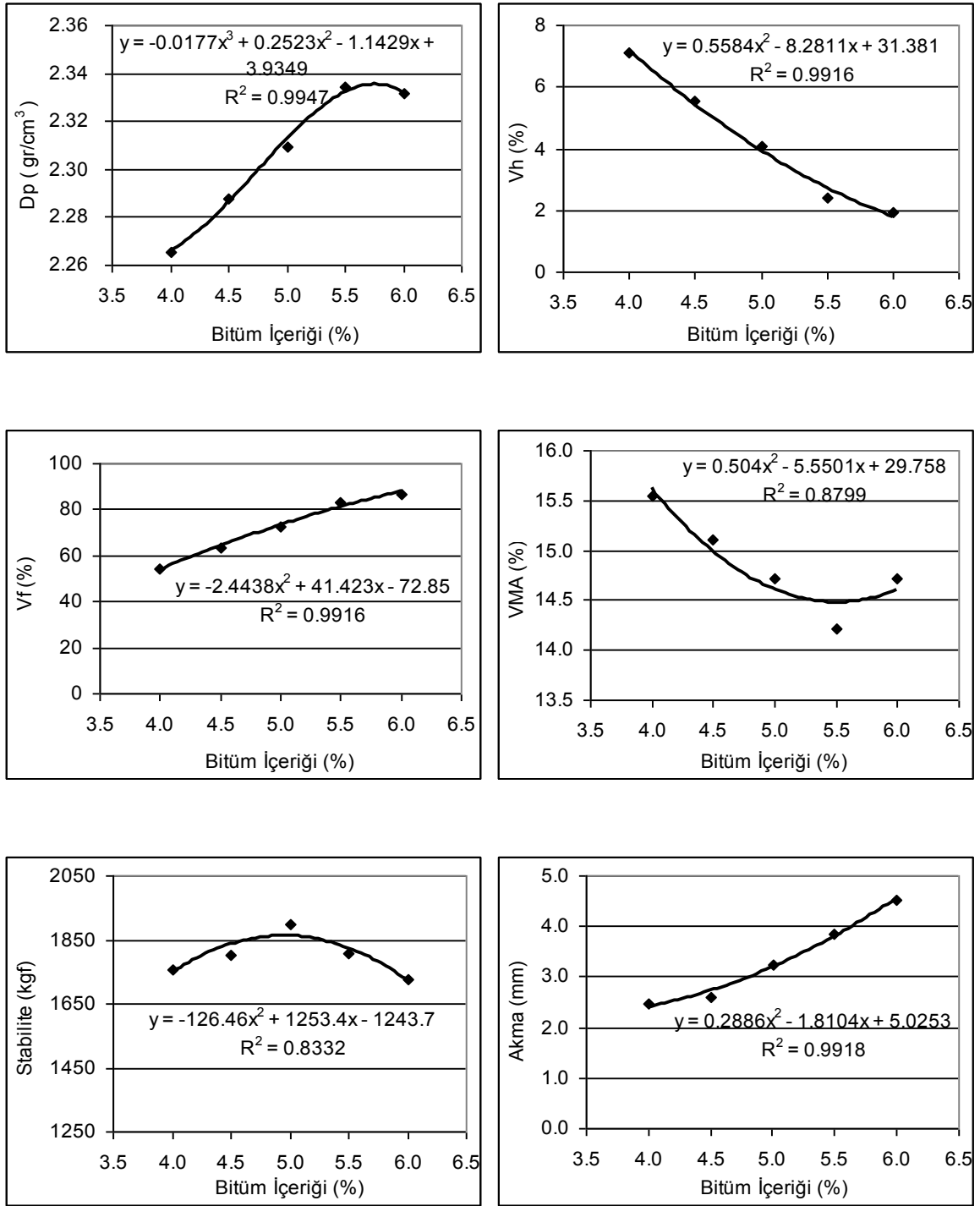


Şekil 4.8. MB₆SBS modifiye bitümü ve filler yerine kalker kullanılan numunelerin dizayn parametrelerinin bitüm içeriği ile değişimi

MB₆SBS bitümü ve filler olarak %6 oranında uçucu kül kullanılan numunelerden elde edilen değerler Tablo 4.13’de, aynı karışımların OBİ hesabında kullanılan grafikleri ise Şekil 4.9’da verilmiştir.

Tablo 4.13. MB_{%6SBS} modifiye bitümü ve filler olarak %6 oranında uçucu kül kullanılan BSK numunelerinden elde edilen sonuçlar

Briket No:	Bitüm			Briket Yüksekliği mm				A gr	C gr	B gr	V cm ³	Dp gr/cm ³	D _t gr/cm ³	V _h %	V.M.A %	V _f %	Akma mm	Stab kg	Düz. Fak.	Düz. Stab
	W _a %	W _b %	gr	1	2	3	Ort													
1	4.0	3.85	48.0	67.1	67.3	67.2	67.2	1244.68	701.41	1251.12	549.71	2.264	2.438	7.10	15.54	54.31	2.26	1877	0.925	1737
2	4.0	3.85	48.0	67.1	66.9	67.0	67.0	1243.69	702.76	1250.67	547.91	2.270					2.35	1948	0.930	1812
3	4.0	3.85	48.0	67.2	67.2	67.0	67.1	1242.63	700.32	1249.76	549.44	2.262					2.75	1855	0.927	1720
ORTALAMALAR												2.265					2.45			1756
4	4.5	4.31	54.0	66.8	66.7	66.9	66.8	1248.39	709.99	1255.40	545.41	2.289	2.423	5.56	15.11	63.18	2.58	1886	0.935	1764
5	4.5	4.31	54.0	66.5	66.6	67.0	66.7	1250.03	710.05	1255.47	545.42	2.292					2.11	1924	0.938	1804
6	4.5	4.31	54.0	66.9	66.8	66.8	66.8	1248.67	709.47	1256.46	546.99	2.283					3.11	1972	0.934	1842
ORTALAMALAR												2.288					2.60			1803
7	5.0	4.76	60.0	66.7	66.5	66.5	66.6	1253.78	715.58	1258.02	542.44	2.311	2.407	4.06	14.72	72.39	3.16	2095	0.941	1971
8	5.0	4.76	60.0	66.7	66.7	66.7	66.7	1254.15	716.83	1259.76	542.93	2.310					2.99	2006	0.938	1881
9	5.0	4.76	60.0	66.6	66.4	66.7	66.6	1255.34	716.21	1260.44	544.23	2.307					3.57	1962	0.941	1846
ORTALAMALAR												2.309					3.24			1899
10	5.5	5.21	66.0	66.8	66.2	66.3	66.4	1261.63	724.46	1265.91	541.45	2.330	2.392	2.42	14.21	82.98	3.78	1950	0.944	1841
11	5.5	5.21	66.0	66.5	66.7	66.4	66.5	1259.87	724.74	1263.99	539.25	2.336					3.89	1906	0.942	1795
12	5.5	5.21	66.0	66.3	66.5	66.8	66.5	1261.22	725.70	1265.56	539.86	2.336					3.88	1896	0.942	1785
ORTALAMALAR												2.334					3.85			1807
13	6.0	5.66	72.0	66.5	66.5	66.2	66.4	1267.45	727.78	1271.82	544.04	2.330	2.377	1.93	14.72	86.88	4.21	1854	0.945	1752
14	6.0	5.66	72.0	66.1	66.0	66.4	66.2	1268.07	728.43	1271.93	543.5	2.333					4.59	1802	0.950	1713
15	6.0	5.66	72.0	66.3	66.4	66.3	66.3	1267.86	727.16	1271.01	543.85	2.331					4.75	1812	0.946	1715
ORTALAMALAR												2.331					4.52			1726



Şekil 4.9. MB₆SBS modifiye bitümü ve filler yerine %6 oranında uçucu kül kullanılan numunelerin dizayn parametrelerinin bitüm içeriği ile değişimi

Çizilen grafiklerden stabilitenin ve hacim özgül ağırlığın maksimum olduğu yüzdelere, boşluk oranının % 4'e, asfaltla dolu boşluk oranının % 70'e tekabül ettiği yüzdelere alınmıştır. Bu yüzde değerlerinin aritmetik ortalaması alınarak optimum bitüm içeriği belirlenmiştir.

Tablo 4.14’de, bütün karışımların OBI’lerin belirlenmesinde kullanılan değerleri göstermektedir.

Tablo 4.14. Karışımların optimum bitüm içeriklerinin tespitinde kullanılan değerler

Karışım Türü		Kriterler (Bitüm İçeriği)				Optimum Bitüm İçeriği
Bağlayıcı Türü	Uçucu Kül İçeriği	Maksimum Stabilite	Maksimum D _p	% 4 V _h	% 70 V _f	
B 160/220	0	4.45	5.61	4.73	4.60	4.85
B 160/220	6	4.24	5.81	4.16	4.23	4.61
MB %3 SBS	0	4.80	5.61	5.30	5.01	5.18
MB %3 SBS	6	4.68	5.75	4.73	4.61	4.94
MB %6 SBS	0	5.03	5.57	5.67	5.23	5.38
MB %6 SBS	6	4.93	5.80	4.98	4.82	5.13

Karışımlar üzerinde uygulanan deneylerde dört farklı uçucu kül içeriği (agrega karışımına göre ağırlıkça %0, %2, %4 ve %6) ve üç farklı bağlayıcı (B 160/220, MB %3 SBS ve MB %6 SBS) kullanılmıştır. Her bir bağlayıcı için %0 ve %6 uçucu kül içeren karışımlar için optimum bitüm içerikleri deneysel olarak belirlenmiş, %2 ve %4 oranında uçucu kül içeren karışımlar için ise oran-orantı ile bulunmuştur. Bütün karışımların optimum bitüm içerikleri Tablo 4.15’de verilmiştir.

Tablo 4.15. Karışımların optimum bitüm içerikleri

Bağlayıcı türü	B 160/220				MB %3SBS				MB %6SBS			
Uçucu kül içeriği	%0	%2	%4	%6	%0	%2	%4	%6	%0	%2	%4	%6
Optimum bitüm içeriği	4.85	4.77	4.69	4.61	5.18	5.10	5.02	4.94	5.38	5.29	5.21	5.13

Her bir karışım türü için optimum bitüm içeriklerinde üç adet kontrol numunesi hazırlanmıştır. Kontrol numuneleri üzerinde de aynı işlemler yapılarak elde edilen değerlerin grafiklerle uygunluğu karşılaştırılmıştır. Kontrol numunelerinden elde edilen değerler Tablo 4.16’da verilmiştir.

Tablo 4.16. Optimum bitüm içeriklerinde hazırlanan numunelerden elde edilen sonuçlar

B 160/220 bitümü ve %0 uçucu kül içeren karışımlardan elde edilen sonuçlar																				
Briket No:	Bitüm			Briket Yüksekliği mm				A gr	C gr	B gr	V cm ³	Dp gr/cm ³	D _t gr/cm ³	V _h %	V.M.A %	V _f %	Akma mm	Stab kg	Düz. Fak.	Düz. Stab
	W _a %	W _b %	gr	1	2	3	Ort													
1	4.85	4.62	58.2	66.3	66.2	66.4	66.3	1256.47	725.55	1258.49	532.94	2.358	2.450	3.86	14.38	73.18	3.49	1673	0.947	1585
2	4.85	4.62	58.2	66.4	66.6	66.4	66.5	1255.49	724.87	1257.98	533.11	2.355					3.55	1608	0.943	1517
3	4.85	4.62	58.2	66.4	66.5	66.2	66.4	1256.82	724.58	1258.44	533.86	2.354					3.17	1704	0.946	1611
ORTALAMALAR												2.356					3.40			1571
B 160/220 bitümü ve %2 uçucu kül içeren karışımlardan elde edilen sonuçlar																				
Briket No:	Bitüm			Briket Yüksekliği mm				A gr	C gr	B gr	V cm ³	Dp gr/cm ³	D _t gr/cm ³	V _h %	V.M.A %	V _f %	Akma mm	Stab kg	Düz. Fak.	Düz. Stab
	W _a %	W _b %	gr	1	2	3	Ort													
1	4.77	4.55	57.2	66.2	66.1	66.4	66.2	1257.35	725.46	1260.47	535.01	2.350	2.440	3.76	14.09	73.29	3.52	1729	0.949	1641
2	4.77	4.55	57.2	66.3	66.5	66.2	66.3	1256.84	724.05	1259.26	535.21	2.348					3.49	1740	0.946	1647
3	4.77	4.55	57.2	66.2	66.4	66.7	66.4	1257.49	724.68	1260.66	535.98	2.346					3.81	1658	0.944	1565
ORTALAMALAR												2.348					3.61			1617
B 160/220 bitümü ve %4 uçucu kül içeren karışımlardan elde edilen sonuçlar																				
Briket No:	Bitüm			Briket Yüksekliği mm				A gr	C gr	B gr	V cm ³	Dp gr/cm ³	D _t gr/cm ³	V _h %	V.M.A %	V _f %	Akma mm	Stab kg	Düz. Fak.	Düz. Stab
	W _a %	W _b %	gr	1	2	3	Ort													
1	4.69	4.48	56.3	66.4	66.2	66.3	66.3	1250.88	722.64	1254.89	532.25	2.350	2.430	3.28	13.45	75.64	3.21	1734	0.947	1642
2	4.69	4.48	56.3	66.3	66.3	66.4	66.3	1249.71	723.05	1255.46	532.41	2.347					3.78	1761	0.946	1667
3	4.69	4.48	56.3	66.2	66.2	66.2	66.2	1250.13	723.67	1254.78	531.11	2.354					3.01	1646	0.950	1563
ORTALAMALAR												2.350					3.33			1624

Tablo 4.16. Optimum bitüm içeriklerinde hazırlanan numunelerden elde edilen sonuçlar (devamı)

B 160/220 bitümü ve %6 uçucu kül içeren karışımlardan elde edilen sonuçlar																				
Briket No:	Bitüm			Briket Yüksekliği mm				A gr	C gr	B gr	V cm³	Dp gr/cm³	D _t gr/cm³	V _h %	V.M.A %	V _f %	Akma mm	Stab kg	Düz. Fak.	Düz. Stab
	W _a %	W _b %	gr	1	2	3	Ort													
1	4.61	4.41	55.3	66.1	66.2	66.4	66.2	1249.84	722.51	1255.05	532.54	2.347	2.420	3.04	13.03	76.66	3.61	1749	0.949	1660
2	4.61	4.41	55.3	66.4	66.7	66.2	66.4	1248.67	721.16	1254.62	533.46	2.341					3.40	1724	0.944	1627
3	4.61	4.41	55.3	66.0	66.2	66.2	66.1	1247.83	722.91	1253.61	530.70	2.351					3.33	1770	0.951	1684
ORTALAMALAR												2.346					3.45			1657
MB _{%3} SBS bitümü ve %0 uçucu kül içeren karışımlardan elde edilen sonuçlar																				
Briket No:	Bitüm			Briket Yüksekliği				A gr	C gr	B gr	V cm³	Dp gr/cm³	D _t gr/cm³	V _h %	V.M.A %	V _f %	Akma mm	Stab kg	Düz. Fak.	Düz. Stab
	W _a %	W _b %	gr	1	2	3	Ort													
1	5.18	4.92	62.2	66.4	66.8	66.8	66.7	1257.48	723.50	1260.58	537.08	2.341	2.439	4.15	15.30	72.87	3.66	1793	0.938	1682
2	5.18	4.92	62.2	66.6	66.8	66.9	66.8	1258.47	723.63	1261.73	538.10	2.339					3.72	1807	0.936	1691
3	5.18	4.92	62.2	66.9	66.5	66.4	66.6	1258.09	722.98	1262.17	539.19	2.333					3.25	1752	0.940	1647
ORTALAMALAR												2.338					3.54			1673
MB _{%3} SBS bitümü ve %2 uçucu kül içeren karışımlardan elde edilen sonuçlar																				
Briket No:	Bitüm			Briket Yüksekliği				A gr	C gr	B gr	V cm³	Dp gr/cm³	D _t gr/cm³	V _h %	V.M.A %	V _f %	Akma mm	Stab kg	Düz. Fak.	Düz. Stab
	W _a %	W _b %	gr	1	2	3	Ort													
1	5.10	4.85	61.2	66.6	66.9	66.5	66.7	1256.49	721.17	1259.91	538.74	2.332	2.429	3.84	14.81	74.08	3.70	1826	0.938	1713
2	5.10	4.85	61.2	66.7	66.7	66.7	66.7	1257.02	720.59	1259.44	538.85	2.333					3.58	1799	0.938	1687
3	5.10	4.85	61.2	66.8	66.5	66.5	66.6	1257.65	722.38	1259.23	536.85	2.343					3.17	1748	0.940	1643
ORTALAMALAR												2.336					3.48			1681

Tablo 4.16. Optimum bitüm içeriklerinde hazırlanan numunelerden elde edilen sonuçlar (devamı)

MB _{%3} SBS bitümü ve %4 uçucu kül içeren karışımlardan elde edilen sonuçlar																				
Briket No:	Bitüm			Briket Yüksekliği mm				A gr	C gr	B gr	V cm ³	Dp gr/cm ³	D _t gr/cm ³	V _h %	V.M.A %	V _f %	Akma mm	Stab kg	Düz. Fak.	Düz. Stab
	W _a %	W _b %	gr	1	2	3	Ort													
1	5.02	4.78	60.2	67.1	66.8	66.4	66.8	1255.21	720.89	1259.26	538.37	2.332	2.419	3.82	14.58	73.83	3.29	1902	0.936	1780
2	5.02	4.78	60.2	66.9	66.7	66.5	66.7	1256.07	719.76	1260.44	540.68	2.323					3.33	1796	0.938	1684
3	5.02	4.78	60.2	66.6	66.6	66.8	66.7	1255.49	719.49	1259.23	539.74	2.326					3.58	1879	0.938	1763
ORTALAMALAR												2.327					3.40			1742
MB _{%3} SBS bitümü ve %6 uçucu kül içeren karışımlardan elde edilen sonuçlar																				
Briket No:	Bitüm			Briket Yüksekliği mm				A gr	C gr	B gr	V cm ³	Dp gr/cm ³	D _t gr/cm ³	V _h %	V.M.A %	V _f %	Akma mm	Stab kg	Düz. Fak.	Düz. Stab
	W _a %	W _b %	gr	1	2	3	Ort													
1	4.94	4.71	59.3	66.9	66.7	66.5	66.7	1254.72	717.33	1258.66	541.33	2.318	2.409	3.69	14.27	74.16	3.07	1896	0.938	1778
2	4.94	4.71	59.3	66.8	66.9	66.9	66.9	1255.15	718.72	1259.08	540.36	2.323					3.44	1915	0.933	1788
3	4.94	4.71	59.3	66.7	66.8	66.9	66.8	1254.81	717.68	1258.45	540.77	2.320					3.39	1848	0.935	1728
ORTALAMALAR												2.320					3.30			1764
MB _{%6} SBS bitümü ve %0 uçucu kül içeren karışımlardan elde edilen sonuçlar																				
Briket No:	Bitüm			Briket Yüksekliği mm				A gr	C gr	B gr	V cm ³	Dp gr/cm ³	D _t gr/cm ³	V _h %	V.M.A %	V _f %	Akma mm	Stab kg	Düz. Fak.	Düz. Stab
	W _a %	W _b	gr	1	2	3	Ort													
1	5.38	5.10	64.5	66.6	66.7	66.5	66.6	1258.33	720.89	1262.81	541.92	2.322	2.433	4.41	15.90	72.28	3.81	1937	0.940	1821
2	5.38	5.10	64.5	66.8	66.6	66.6	66.7	1257.85	719.72	1261.52	541.80	2.322					3.26	1885	0.938	1769
3	5.38	5.10	64.5	66.5	66.7	66.4	66.5	1259.47	722.91	1262.87	539.96	2.333					3.45	1972	0.942	1857
ORTALAMALAR												2.325					3.51			1815

Tablo 4.16. Optimum bitüm içeriklerinde hazırlanan numunelerden elde edilen sonuçlar (devamı)

MB _{%6} SBS bitümü ve %2 uçucu kül içeren karışımlardan elde edilen sonuçlar																				
Briket No:	Bitüm			Briket Yüksekliği				A gr	C gr	B gr	V cm ³	Dp gr/cm ³	D _t gr/cm ³	V _h %	V.M.A %	V _f %	Akma mm	Stab kg	Düz. Fak.	Düz. Stab
	W _a %	W _b %	gr	1	2	3	Ort													
1	5.29	5.02	63.5	66.5	66.5	66.7	66.6	1257.88	718.57	1261.00	542.43	2.319	2.423	4.11	15.42	73.34	2.92	1891	0.941	1779
2	5.29	5.02	63.5	66.2	66.6	66.6	66.5	1256.45	719.71	1260.79	541.08	2.322					3.25	1917	0.943	1808
3	5.29	5.02	63.5	66.8	66.4	66.4	66.5	1258.16	720.62	1260.85	540.23	2.329					3.72	1920	0.942	1808
ORTALAMALAR												2.323					3.30			1798
MB _{%6} SBS bitümü ve %4 uçucu kül içeren karışımlardan elde edilen sonuçlar																				
Briket No:	Bitüm			Briket Yüksekliği				A gr	C gr	B gr	V cm ³	Dp gr/cm ³	D _t gr/cm ³	V _h %	V.M.A %	V _f %	Akma mm	Stab kg	Düz. Fak.	Düz. Stab
	W _a %	W _b %	gr	1	2	3	Ort													
1	5.21	4.95	62.5	66.7	66.2	66.5	66.5	1256.64	719.71	1260.79	541.08	2.322	2.413	3.77	14.91	74.74	3.31	1932	0.943	1822
2	5.21	4.95	62.5	66.5	66.7	66.8	66.7	1255.31	718.46	1259.97	541.51	2.318					3.51	1999	0.938	1876
3	5.21	4.95	62.5	66.7	66.7	66.5	66.6	1256.80	720.13	1260.44	540.31	2.326					3.68	1925	0.939	1808
ORTALAMALAR												2.322					3.50			1835
MB _{%6} SBS bitümü ve %6 uçucu kül içeren karışımlardan elde edilen sonuçlar																				
Briket No:	Bitüm			Briket Yüksekliği				A gr	C gr	B gr	V cm ³	Dp gr/cm ³	D _t gr/cm ³	V _h %	V.M.A %	V _f %	Akma mm	Stab kg	Düz. Fak.	Düz. Stab
	W _a %	W _b %	gr	1	2	3	Ort													
1	5.13	4.88	61.6	66.4	66.3	66.8	66.5	1256.15	717.48	1260.94	543.46	2.311	2.403	3.59	14.55	75.35	3.18	2002	0.942	1887
2	5.13	4.88	61.6	66.5	66.6	66.8	66.6	1255.83	718.31	1259.76	541.45	2.319					3.65	1973	0.939	1853
3	5.13	4.88	61.6	66.7	66.6	66.4	66.6	1256.18	719.47	1260.92	541.45	2.320					3.44	1916	0.941	1802
ORTALAMALAR												2.317					3.42			1847

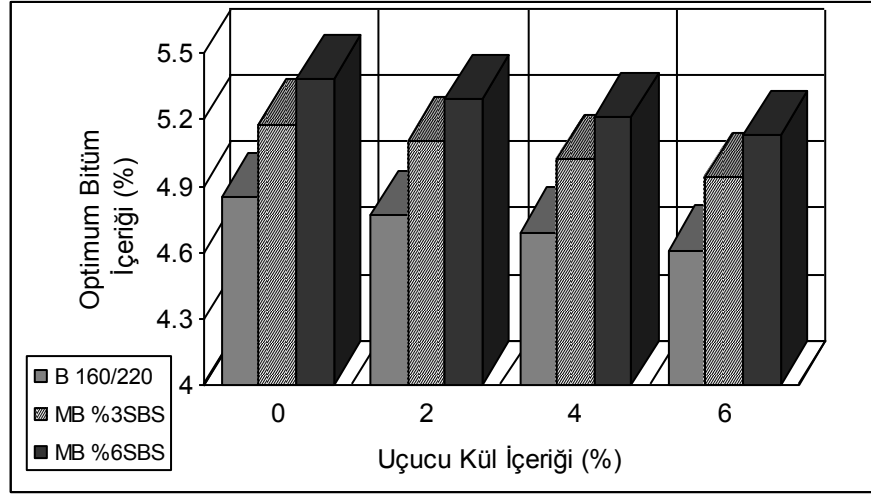
Optimum bitüm içeriklerinde hazırlanan karışımlardan elde edilen değerler şartname kriterleri ile karşılaştırılarak karışımların kullanılabilirlikleri belirlenmiştir. Karışımlardan elde edilen değerler ve şartname kriterleri Tablo 4.17’de verilmiştir.

Tablo 4.17. Karışımlardan elde edilen değerler ve şartname kriterleri

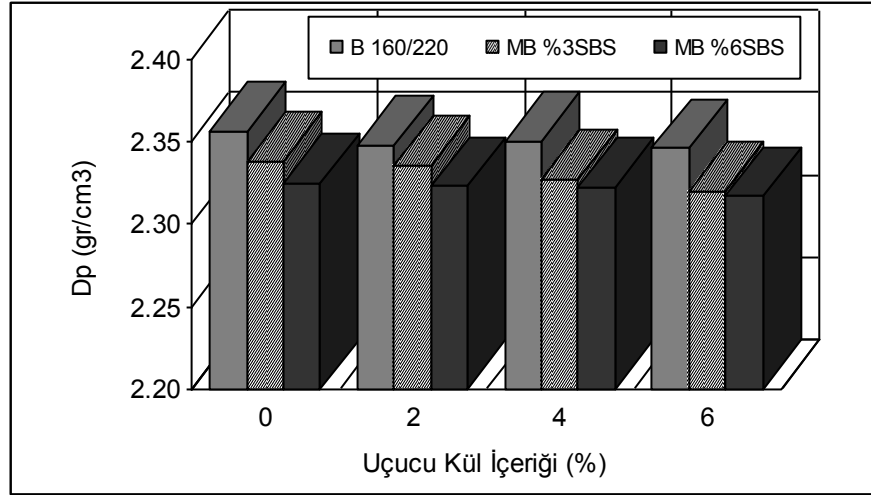
Bağlayıcı Türü	UK içeriği (%)	OBİ (%)	Dp (gr/cm ³)	Vh (%)	VMA (%)	Vf (%)	Akma (mm)	Stabilite (kgf)	Marshall Oranı MQ	
									(kgf/mm)	(kNf/mm)
B 160/220	0	4.85	2.356	3.86	14.38	73.18	3.40	1571	462.1	4.62
	2	4.77	2.348	3.76	14.09	73.29	3.61	1617	477.9	4.48
	4	4.69	2.350	3.28	13.45	75.64	3.33	1624	487.9	4.88
	6	4.61	2.346	3.04	13.03	76.66	3.45	1657	480.3	4.80
MB_{%3} SBS	0	5.18	2.338	4.15	15.30	72.87	3.54	1673	472.6	4.73
	2	5.1	2.336	3.84	14.81	74.08	3.48	1681	483.0	4.83
	4	5.02	2.327	3.82	14.58	73.83	3.40	1742	512.4	5.12
	6	4.94	2.320	3.69	14.27	74.16	3.30	1764	534.5	5.35
MB_{%6} SBS	0	5.38	2.325	4.41	15.90	72.28	3.51	1815	517.1	5.17
	2	5.29	2.323	4.11	15.42	73.34	3.30	1798	544.8	5.45
	4	5.21	2.322	3.77	14.91	74.74	3.50	1835	524.3	5.24
	6	5.13	2.317	3.59	14.55	75.35	3.42	1847	540.1	5.40
Şartname kriteri	–	4–7	–	3–5	min.14	65–75	2–4	min. 900	-	-

Tablo 4.17’de görüldüğü üzere bütün karışımların optimum bitüm içeriği, boşluk oranı (Vh), akma ve stabilite şartlarını sağladığı belirlenmiştir. B 160/220 bitümü ile hazırlanan ve filler yerine ağırlıkça %4 ve %6 oranında uçucu kül kullanılan karışımların agregalar arası boşluk (VMA) ve asfaltla dolu boşluk (Vf) şartlarını sağlamadığı belirlenmiştir. Ayrıca MB_{%6}SBS bitümü ile hazırlanan ve filler yerine %6 oranında uçucu kül içeren karışım da asfaltla dolu boşluk (Vf) şartname kriterini sağlamamıştır.

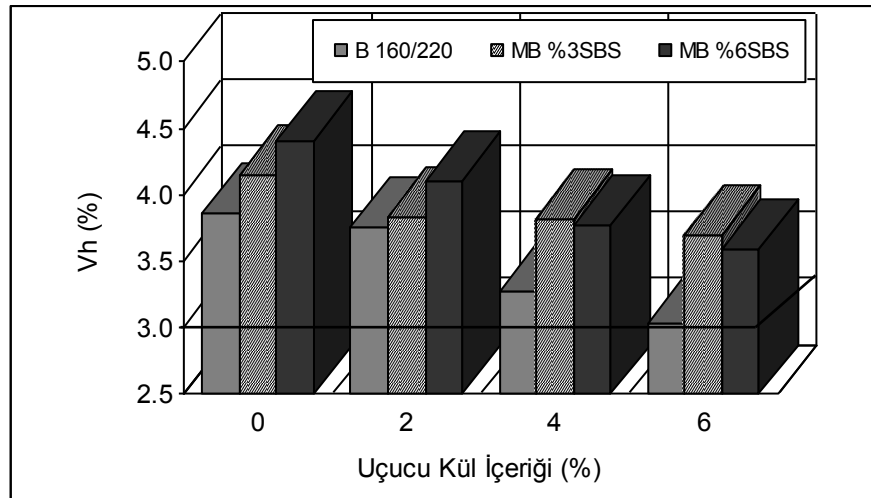
Karışımların optimum bitüm içeriği, pratik özgül ağırlık (Dp), boşluk oranı (Vh), agregalar arası boşluk oranı (VMA), bitümle dolu boşluk oranı (Vf), Stabilite, akma ve Marshall oranı (MQ) değerlerinin bağlayıcı türü ve uçucu kül içeriği ile değişimi sırasıyla Şekil 4.10–4.17’de verilmiştir.



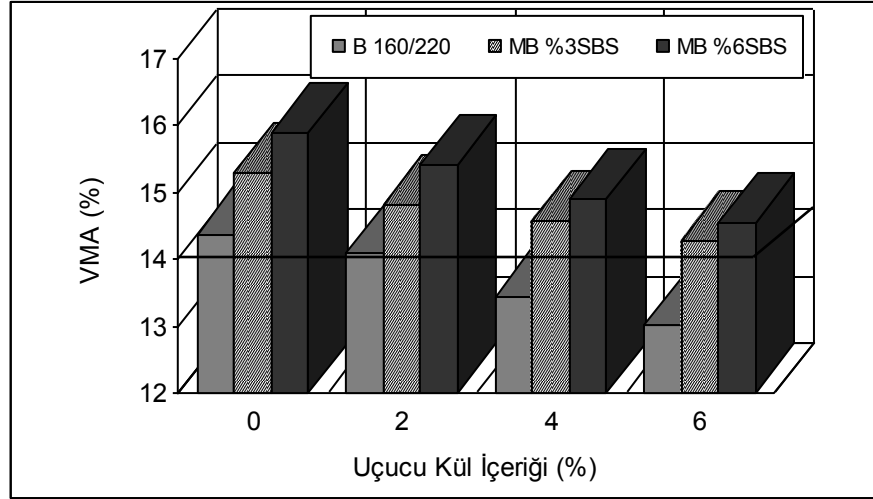
Şekil 4.10. Optimum bitüm içeriği değerlerinin SBS ve UK içeriği ile değişimi



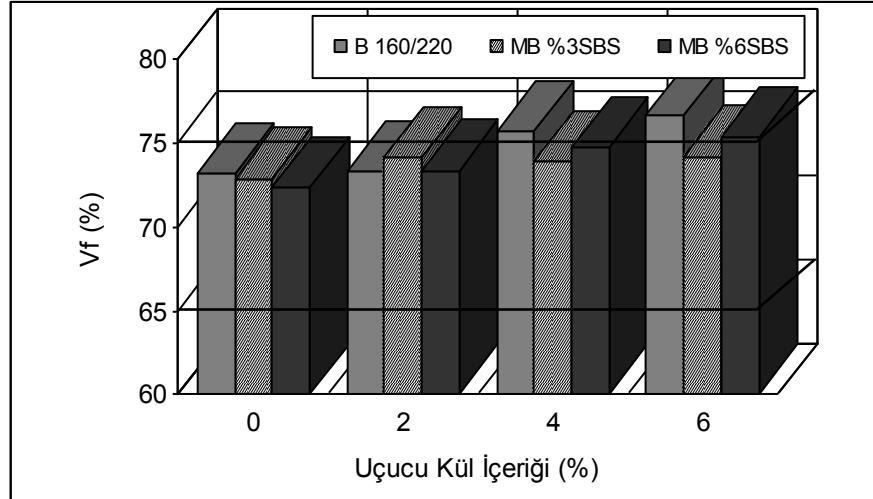
Şekil 4.11. Karışımların pratik özgül ağırlık değerlerinin SBS ve UK içeriği ile değişimi



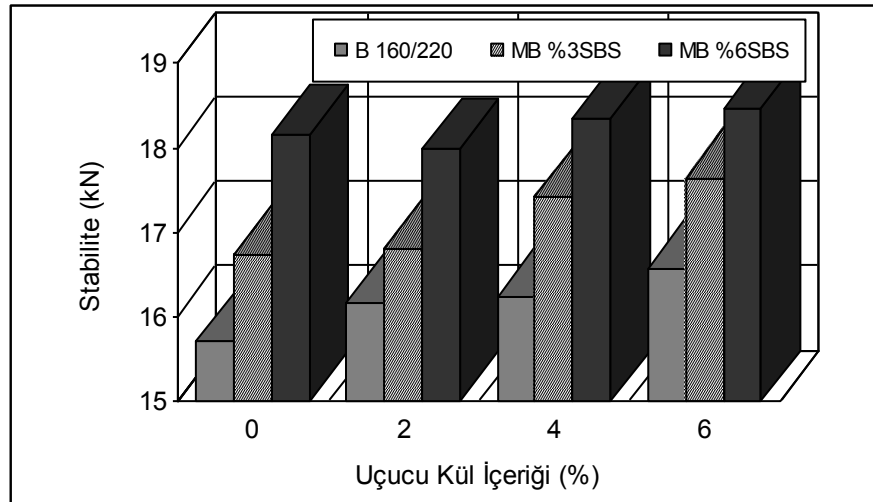
Şekil 4.12. Karışımların boşluk oranlarının SBS ve UK içeriği ile değişimi



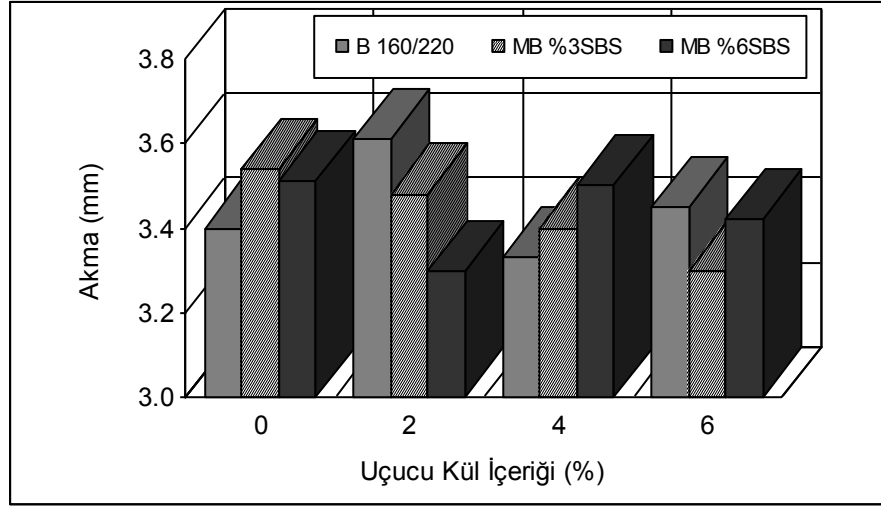
Şekil 4.13. Karışımlardaki agregalar arası boşluk oranlarının SBS ve UK içeriği ile değişimi



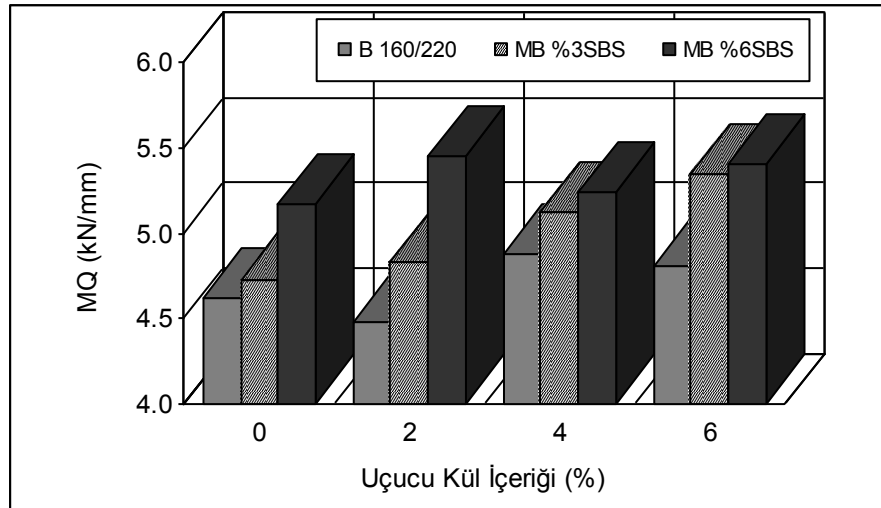
Şekil 4.14. Karışımların bitümle dolu boşluk oranlarının SBS ve UK içeriği ile değişimi



Şekil 4.15. Karışımların Stabilite değerlerinin SBS ve UK içeriği ile değişimi



Şekil 4.16. Karışımların akma değerlerinin SBS ve UK içeriği ile değişimi



Şekil 4.17. Karışımların Marshall oranı değerlerinin SBS ve UK içeriği ile değişimi

Şekil 4.10'da görülen karışımların optimum bitüm içerikleri incelendiğinde bitüm modifikasyonunda kullanılan SBS içeriği arttıkça karışımların optimum bitüm içeriğinin arttığı belirlenmiştir. Ayrıca filler yerine uçucu kül kullanımı ile optimum bitüm içerikleri azalmıştır. Karışımlar içerisinde en yüksek optimum bitüm ihtiyacına MB_{%6SBS} bağlayıcı ile hazırlanan ve uçucu kül içermeyen karışımların (%5.38) sahip olduğu, en düşük bitüm ihtiyacına ise B 160/220 bitümü ile hazırlanan ve filler yerine %6 uçucu kül içeren karışımların sahip olduğu belirlenmiştir.

Şekil 4.11'de görülen karışımların pratik özgül ağırlıkları (D_p) incelendiğinde SBS ve uçucu kül kullanımının pratik özgül ağırlık değerlerini azalttığı belirlenmiştir. Bu

duruma hem SBS'in özgül ağırlığının saf bitümün özgül ağırlığından düşük olması hem de uçucu külün özgül ağırlığının kalker fillerin özgül ağırlığından düşük olması neden olmuştur. Karışımlar içerisinde en yüksek pratik özgül ağırlık değerine B 160/220 bitümü ile hazırlanan ve uçucu kül içermeyen karışımın (2.356) sahip olduğu, en düşük pratik özgül ağırlık değerine (2.317) ise MB₆SBS bitümü ile hazırlanan ve filler olarak %6 oranında uçucu kül içeren karışımların sahip olduğu belirlenmiştir.

Karışımların hava boşluğu oranları (Şekil 4.12) incelendiğinde genel olarak bitüm modifikasyonunda SBS kullanımı ile karışımların hava boşluklarının arttığı tespit edilmiştir. Karışımlarda filler yerine kullanılan uçucu kül miktarı arttıkça boşluk oranlarının azaldığı tespit edilmiştir. Bütün karışımlar şartname kriterini (%3–5) sağlamıştır. Karışımlar içerisinde en yüksek hava boşluğuna MB₆SBS bitümü ile hazırlanan ve uçucu kül içermeyen karışımın (%4.41) sahip olduğu, en düşük hava boşluğu oranına ise B 160/220 saf bitümü ile hazırlanan ve filler yerine %6 oranında uçucu kül içeren karışımın (%3.04) sahip olduğu belirlenmiştir.

Şekil 4.13'de görülen karışımların agregalar arası boşluk oranları değerlendirildiğinde SBS kullanımı ile agregalar arası boşluk oranlarının arttığı, filler yerine uçucu kül kullanımı ile ise bu değerlerin azaldığı tespit edilmiştir. B 160/220 bitümü ile hazırlanan ve filler olarak %4 ve %6 oranında uçucu kül kullanılan karışımların agregalar arası boşluk şartname kriterini (min. %14) sağlamadığı belirlenmiştir. Karışımlar içerisinde en yüksek VMA değerine MB₆SBS bitümü ile hazırlanan ve uçucu kül kullanılmayan karışımın sahip olduğu (%15.90), en düşük VMA değerine ise B 160/220 saf bitümü ile hazırlanan ve filler yerine %6 uçucu kül kullanılan karışımın (%13.03) sahip olduğu belirlenmiştir.

Karışımların bitümle dolu boşluk oranları (V_f) incelendiğinde (Şekil 4.14) SBS ve uçucu kül kullanımı ile düzenli bir değişimin olmadığı belirlenmiştir. Karışımlar değerlendirildiğinde B 160/220 bitümü ile hazırlanan ve filler olarak %4 ve %6 oranında uçucu kül kullanılan karışımların ayrıca MB₆SBS bitümü ile hazırlanan ve filler olarak %6 oranında uçucu kül kullanılan karışımın bitümle dolu boşluk oranı şartname kriterini (%65–75) sağlamadığı belirlenmiştir. Şartname kriterini sağlamamasına rağmen bu karışımlarda çalışmanın geri kalanında değerlendirilmiştir.

Şekil 4.15'de görülen Stabilitate değerlerinin SBS ve uçucu kül içeriği ile değişimi incelendiğinde hem SBS kullanımı hem de uçucu kül kullanımı ile karışımların Stabilitate değerlerinin arttığı belirlenmiştir. Karışımlar içerisinde en düşük Stabilitate değerine B

160/220 saf bitümü ile hazırlanan ve filler olarak tamamen kalker kullanılan karışımların sahip olduğu, en yüksek Stabilite değerine ise MB_{6SBS} bitümü ile hazırlanan ve filler olarak %6 oranında uçucu kül içeren karışımın sahip olduğu belirlenmiştir. Uçucu kül kullanılmadan bitüm modifikasyonunda %3 oranında SBS kullanımı ile Stabilite değeri %6.5, %6 SBS kullanımı ile ise %15.5 oranında artmıştır. SBS kullanılmadan saf B 160/220 saf bitümü ile hazırlanan ve filler yerine %4 oranında uçucu kül içeren karışımlarda filler yerine tamamen kalker kullanılan karışıma göre Stabilite değeri %3.4, %6 oranında uçucu kül içeren karışımda ise %5.5 oranında artmıştır. Bu sonuçlardan SBS ile bitüm modifikasyonunun uçucu kül ile karışım modifikasyonuna göre stabilite değerleri açısından daha etkin olduğu söylenebilmektedir. MB_{6SBS} bitümü ile hazırlanan ve filler olarak %6 oranında uçucu kül içeren karışımın Stabilite değeri B 160/220 saf bitümü ile hazırlanan ve filler olarak kalker kullanılan karışıma göre %17.6 oranında daha yüksek çıkmıştır. Bu durum bitüm modifikasyonunda SBS ve karışım modifikasyonunda uçucu kül kullanımının her iki katkının ayrı ayrı kullanımına göre stabilite değerleri üzerindeki olumlu etkilerini arttırdığını göstermektedir.

Şekil 4.16'da görülen karışımların akma değerleri incelendiğinde bütün karışımların akma değerlerinin şartname kriterini sağladığı (2-4 mm) belirlenmiştir. SBS ve uçucu kül kullanımı ile akma değerlerinde düzenli bir değişme meydana gelmemiş, değerlerin genel olarak birbirine yakın olduğu tespit edilmiştir. Karışımlar değerlendirildiğinde en yüksek akma değerine B 160/220 saf bitümü ile hazırlanan ve filler olarak %2 oranında uçucu kül içeren karışımın sahip olduğu, en düşük akma değerine ise MB_{6SBS} bitümü ile hazırlanan ve filler olarak %2 oranında uçucu kül içeren karışımın sahip olduğu tespit edilmiştir.

Stabilite değerlerinin akma değerlerine oranlanması ile elde edilen ve kalıcı deformasyona karşı dayanım parametresi olarak kabul edilen Şekil 4.17'de görülen Marshall oranı (MQ) değerleri incelendiğinde SBS ve uçucu kül kullanımı ile MQ değerlerinin genel olarak arttığı belirlenmiştir. Karışımlar içerisinde en düşük MQ değerine B 160/220 bitümü ile hazırlanan ve %2 oranında uçucu kül içeren karışımın, en yüksek MQ değerlerine ise MB_{6SBS} bitümü ile hazırlanan ve filler olarak %4 ve %6 oranlarında uçucu kül içeren karışımların sahip olduğu belirlenmiştir. MB_{6SBS} bitümü ile hazırlanan ve filler olarak %6 oranında uçucu kül içeren karışımın MQ değerinin B 160/220 saf bitümü ile hazırlanan ve uçucu kül içermeyen karışıma göre %16.9 oranında daha yüksek olduğu belirlenmiştir.

4.3.2. İndirekt Çekme Rijitlik Modülü Deney Sonuçları

Saf ve değişik oranlarda SBS ve uçucu kül içeren bitümlü sıcak karışım numuneleri üzerinde BS DD 213 standardına uygun olarak indirekt çekme rijitlik modülü (ITSM) deneyi uygulanarak karışımların rijitlikleri belirlenmiştir. ITSM deneyi tahribatsız bir deney olduğundan Marshall deneyinde kullanılan numunelere önce ITSM deneyleri uygulanmıştır. Deneylerde her bir karışım türü için üç adet numune denenmiştir. Deneyler, UMATTA deney aleti kullanılarak 25°C sıcaklıkta yapılmıştır. Deneyde 5 adet ön yükleme, ardından 5 defa deney yükleme yapılarak dinamik yükler karşısında bitümlü sıcak karışımların rijitlikleri belirlenmektedir. Deneyde yük periyodu 3000 ms., yük artış süresi ise 124 ms. olarak seçilmiştir. Deformasyon kontrollü bir deney olan ITSM deneyinde hedef deformasyon 5 µm. olarak seçilmiştir. 5 defa tekrarlanan ön yükleme sırasında cihaz otomatik olarak numunede yatay ekseninde 5 µm. deformasyon meydana getirecek yükü belirlemektedir (Yılmaz, 2011). Ardından numuneye uygulanan 5 darbe sonucu Formül 2.15 kullanılarak belirlenen ITSM değerlerinin ortalamasından numunenin ITSM değeri belirlenmektedir. Deneyde poisson oranı 0,35 olarak alınmıştır.

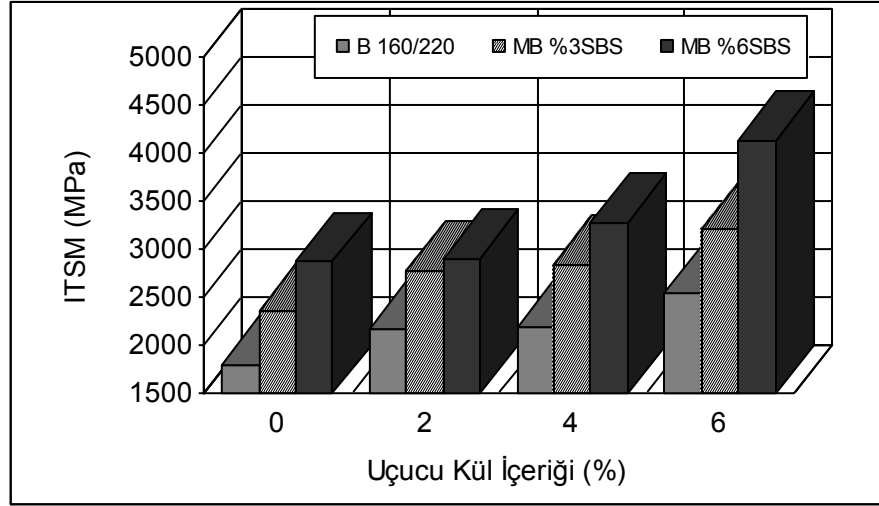
Karışımlara uygulanan ITSM deneylerinden elde edilen sonuçlar Tablo 4.18’de verilmiştir. Tablo 4.18’de görüldüğü üzere her bir numune iki kez olmak üzere her bir karışım türünden 6 değer elde edilmiştir. Karışımların ITSM değerlerinin ortalamaları Şekil 4.18’te verilmiştir.

Tablo 4.18. Karışımların ITSM deney sonuçları

Uçucu Kül İçeriği, (%)	Numune No	Deneme No	Bağlayıcı Türü								
			B 160/220			MB %3 SBS			MB %6 SBS		
			h_{ort} (mm)	ITSM, (MPa)	ITSM _{ort} (MPa)	h_{ort} (mm)	ITSM, (MPa)	ITSM _{ort} (MPa)	h_{ort} (mm)	ITSM, (MPa)	ITSM _{ort} (MPa)
0	1	1	66.3	1931	1796	66.7	2283	2366	66.6	2884	2874
		2		1876			2465			2723	
	2	1	66.5	1661		66.8	2449		66.7	2863	
		2		1715			2218			2881	
	3	1	66.4	1911		66.6	2365		66.5	2916	
		2		1682			2418			2978	
2	1	1	66.2	2121	2170	66.7	2747	2784	66.6	2859	2914
		2		2024			2663			2943	
	2	1	66.3	2219		66.7	2821		66.5	2969	
		2		2037			2646			3017	
	3	1	66.4	2274		66.6	2905		66.5	2855	
		2		2342			2920			2839	

Tablo 4.18. Karışımların ITSM Deney Sonuçları (devamı)

Uçucu Kül İçeriği, (%)	Numune No	Deneme No	Bağlayıcı Türü								
			B 160/220			MB %3 SBS			MB %6 SBS		
			h_{ort} (mm)	ITSM, (MPa)	ITSM _{ort} (MPa)	h_{ort} (mm)	ITSM, (MPa)	ITSM _{ort} (MPa)	h_{ort} (mm)	ITSM, (MPa)	ITSM _{ort} (MPa)
4	1	1	66.3	2220	2202	66.8	2852	2839	66.5	3260	3287
		2		2190			2799			3356	
	2	1	66.3	2183		66.7	2825		66.7	3551	
		2		2066			2705			3219	
	3	1	66.2	2217		66.7	2878		66.6	3168	
		2		2334			2977			3166	
6	1	1	66.2	2612	2557	66.7	3185	3208	66.5	4273	4139
		2		2481			3044			4542	
	2	1	66.4	2502		66.9	3230		66.6	4005	
		2		2573			3371			4371	
	3	1	66.1	2665		66.8	3172		66.6	3992	
		2		2507			3248			3651	



Şekil 4.18. Karışımların ITSM değerleri

Şekil 4.18’de görüldüğü üzere bitüm modifikasyonunda SBS kullanımı ve karışım modifikasyonunda uçucu kül kullanımı ile karışımların indirekt çekme rijitlik modülü değerleri artmıştır. B 160/220 bitümü ile hazırlanan karışımlarda filler olarak tamamen kalker kullanılan karışıma göre filler olarak %4 oranında uçucu kül içeren karışımın ITSM değeri %22.6, %6 uçucu kül kullanılan karışımın ITSM değeri ise %42.4 daha yüksek çıkmıştır. MB_{%3SBS} bitümü ile hazırlanan karışımlarda uçucu kül içermeyen karışıma göre filler olarak %2 uçucu kül içeren karışımın ITSM değeri %17.7, %4 uçucu kül içeren karışımın ITSM değeri %20.0 ve %6 uçucu kül içeren karışımın ITSM değeri ise %35.6 daha yüksek çıkmıştır. MB_{%6SBS} bitümü ile hazırlanan karışımlarda uçucu kül içermeyen karışıma göre filler olarak %4 uçucu kül içeren karışımın ITSM değeri %14.4 ve %6 uçucu kül içeren karışımın ITSM değeri ise %44.0 daha yüksek çıkmıştır.

Katkı türünün ayrı ayrı ve birleşik etkisini daha rahat anlayabilmek amacıyla bütün karışımların modifikasyon indeksi (MI_{ITSM}) değerleri belirlenmiştir. MI değerleri karışımların ITSM değerlerinin saf karışımın (B 160/220 bitümü ile hazırlanan ve uçucu kül içermeyen) ITSM değerine oranlanması ile elde edilmiştir. Karışımların MI değerleri Tablo 4.19’da verilmiştir.

Tablo 4.19’da B 160/220 bitümüne ait sütun ve satır incelendiğinde SBS modifikasyonunun uçucu kül modifikasyonuna göre daha etkin olduğu görülmektedir. Bütün karışımlar incelendiğinde MB_{%6SBS} bitümü ve filler olarak %6 uçucu kül içeren karışımın en yüksek MI değerine sahip olduğu belirlenmiştir.

Tablo 4.19. Karışımların MI_{ITSM} değerleri

Uçucu Kül İçeriği (%)	Bağlayıcı Türü		
	B 160/220	MB %3 SBS	MB %6 SBS
0	1.00	1.32	1.60
2	1.21	1.55	1.62
4	1.23	1.58	1.83
6	1.42	1.79	2.30

ITSM deney sonuçlarından, hem SBS hem de uçucu kül kullanımı ile normal sıcaklıklarda karışımların rijitliğinin artacağı, bu iki katkı maddesinin birlikte kullanımı ile de karışımların rijitlikleri üzerindeki etkilerinin daha da artacağı söylenebilir.

4.3.3. Nem Hasarına Karşı Dayanım (AASHTO T 283) Deney Sonuçları

Saf ve katkı malzemesi olarak SBS ve uçucu kül içeren bitümlü sıcak karışım numuneleri üzerinde AASHTO T 283 standardına uygun olarak çekme dayanımı oranı deneyi uygulanarak karışımların nem hasarına karşı dayanımları belirlenmiştir. Her bir karışım türü için $\%7 \pm 0,5$ boşluk oranına sahip olacak şekilde 6 adet numune hazırlanmıştır. AASHTO T 283 standardına uygun olarak karışımların nem hasarına karşı dayanımlarının tespitinde kullanılacak numuneler hazırlanırken Marshall tokmağı ile numunelerin her bir yüzeyine 40 darbe uygulanmıştır. Numuneler 24 saat oda sıcaklığında soğumaya bırakılmış ardından numunelerin hacimsel özellikleri belirlenerek boşluk oranları birbirine yakın olacak şekilde gruplandırılmıştır. Karışım numunelerinden üçer tanesine vakum uygulanarak boşluklarının $\%70-80$ oranında suyla dolması sağlanmıştır. Bu doygunluk oranını sağlamak amacıyla koşullandırmaya maruz bırakılacak numunelerin hepsine 5 dakika süresince vakum uygulanmıştır. Vakum uygulanan numuneler streç film ile kaplanmış, içerisinde 10 ml. su bulunan poşetlere konularak poşetlerin ağzı iyice kapatılmıştır. Numuneler -18°C sıcaklıktaki dondurucuda 16 saat bekletilmiş ardından 60°C 'deki suda 24 saat bekletilmiştir. Bu sürenin sonunda numuneler poşetten ve streç filminden çıkarılmış ve 25°C 'deki suda 2 saat bekletilerek kırılmıştır. Koşullandırılmamış numuneler de 25°C 'deki suda 2 saat bekletilerek Marshall deney aletinde kırılmıştır. Kırma işlemi süresince numunelere 2 inç/dakika'lık (50,8 mm/sn) sabit yükleme hızı uygulanmıştır. Maksimum yük değerleri yardımıyla çekme dayanımı (TS) değerleri

Formül 2.13 kullanılarak, çekme dayanımı oranları (TSR) ise Formül 2.14 kullanılarak belirlenmiştir. TSR değerleri koşullandırılmış numunelerin TS değerlerinin koşullandırılmamış numunelerin TS değerlerine oranlanması ile elde edilmiştir. Koşullandırılmamış numunelere uygulanan deneylerden elde edilen sonuçlar Tablo 4.20’de, koşullandırılmış numunelere uygulanan deneylerden elde edilen sonuçlar ise Tablo 4.21’de verilmiştir.

Her bir karışım türü için üç numune deneye tabi tutulmuştur. Koşullandırılmamış üç numunenin ortalamasından elde edilen TS değerleri Şekil 4.19’da, koşullandırılmış numunelerin ortalamasından elde edilen TS değerleri ise Şekil 4.20’de verilmiştir. Karışımların TSR değerleri ise Şekil 4.21’de görülmektedir.

Tablo 4.20. Koşullandırılmamış numunelerin çekme dayanımı oranı deney sonuçları

SBS İçeriği (%)	Uçucu Kül İçeriği (%)	Numune No	h_{ort} (mm)	Havadaki Ağırlık (gr)	Sudaki Ağırlık (gr)	Doygun Kuru Yüzey Ağırlık (gr)	Dp	Dt	Boşluk (%)	Maksimum Yük, (kN)	Çekme Dayanımı (kPa)
0	0	1	66.8	1249.32	709.49	1258.56	2.275	2.450	7.13	6.23	594.0
		2	66.9	1249.45	710.33	1258.19	2.281		6.91	6.22	592.2
		3	66.7	1250.41	710.59	1259.06	2.280		6.95	6.54	624.5
		Ortalama									603.6
	2	4	66.9	1249.08	709.36	1259.74	2.269	2.440	6.99	6.57	625.5
		5	66.7	1250.58	709.95	1259.72	2.275		6.77	6.44	615.0
		6	66.9	1249.75	708.71	1260.39	2.265		7.16	6.71	638.8
		Ortalama									626.4
	4	7	66.7	1248.36	708.14	1257.79	2.271	2.430	6.54	6.96	664.6
		8	67.0	1249.16	708.47	1259.07	2.269		6.64	6.45	613.2
		9	67.0	1248.40	707.26	1258.44	2.265		6.79	6.92	657.9
		Ortalama									645.2
	6	10	67.1	1249.33	707.73	1260.22	2.261	2.420	6.56	8.21	779.3
		11	67.0	1250.16	706.02	1260.71	2.254		6.87	7.83	744.4
		12	67.3	1249.97	705.35	1259.04	2.258		6.71	8.11	767.5
		Ortalama									763.7
3	0	13	67.2	1255.09	708.29	1264.31	2.257	2.439	7.45	7.41	702.3
		14	66.9	1257.45	711.51	1266.33	2.266		7.08	7.83	745.5
		15	67.0	1258.92	713.03	1269.77	2.261		7.29	7.96	756.7
		Ortalama									734.8
	2	16	67.0	1256.13	709.16	1266.80	2.253	2.429	7.26	8.46	804.3
		17	67.0	1255.87	708.88	1266.05	2.254		7.20	8.02	762.4
		18	67.2	1257.46	710.32	1266.23	2.262		6.88	8.60	815.1
		Ortalama									793.9

Tablo 4.20. Koşullandırılmamış numunelerin çekme dayanımı oranı deney sonuçları (devamı)

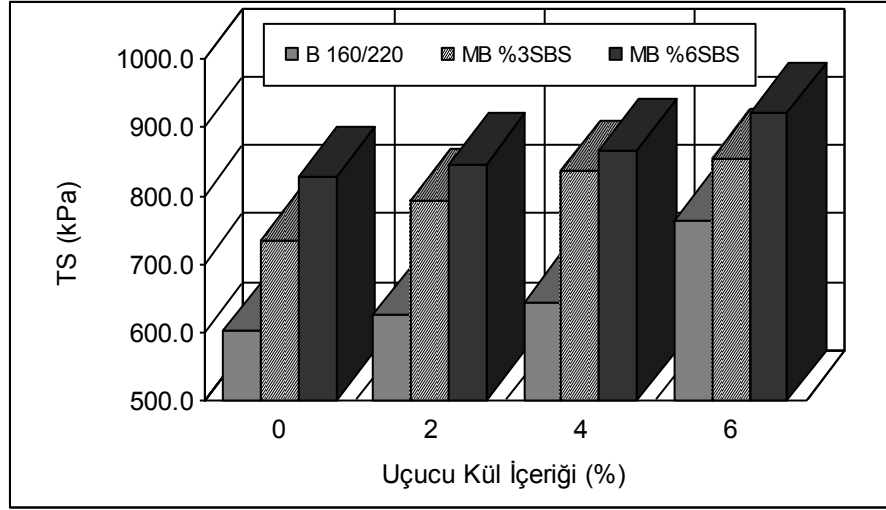
SBS İçeriği (%)	Uçucu Kül İçeriği (%)	Numune No	h_{ort} (mm)	Havadaki Ağırlık (gr)	Sudaki Ağırlık (gr)	Doygun Kuru Yüzey Ağırlık (gr)	Dp	Dt	Boşluk (%)	Maksimum Yük, (kN)	Çekme Dayanımı (kPa)
3	4	19	66.9	1255.55	706.21	1264.06	2.251	2.419	6.96	9.03	859.7
		20	67.3	1254.87	704.60	1263.48	2.245		7.18	8.57	811.1
		21	67.2	1255.29	704.51	1261.27	2.255		6.79	8.85	838.8
		Ortalama									836.5
	6	22	67.3	1253.89	703.93	1263.28	2.242	2.409	6.95	9.05	856.5
		23	67.3	1255.16	705.17	1264.14	2.245		6.79	9.23	873.5
		24	67.4	1254.73	702.99	1262.50	2.243		6.91	8.78	829.7
		Ortalama									853.3
6	0	25	67.1	1258.73	710.39	1267.80	2.258	2.433	7.19	8.76	831.5
		26	67.0	1256.97	711.35	1266.16	2.266		6.88	8.90	846.1
		27	67.1	1257.22	711.87	1265.95	2.269		6.74	8.46	803.1
		Ortalama									826.9
	2	28	67.2	1256.84	710.30	1265.73	2.263	2.423	6.61	9.13	865.4
		29	67.3	1257.39	709.57	1267.82	2.252		7.04	8.76	829.1
		30	67.0	1256.80	710.29	1266.49	2.260		6.74	8.88	844.2
		Ortalama									846.2
	4	31	67.3	1255.20	707.09	1265.09	2.249	2.413	6.78	8.89	841.4
		32	67.2	1256.50	708.29	1267.27	2.248		6.84	9.44	894.8
		33	67.3	1256.25	706.60	1266.75	2.243		7.06	9.12	863.1
		Ortalama									866.4
	6	34	67.4	1256.57	704.62	1267.36	2.233	2.403	7.08	9.72	918.6
		35	67.5	1256.77	703.25	1266.92	2.230		7.22	10.07	950.2
		36	67.2	1255.41	703.29	1265.83	2.232		7.13	9.42	892.9
		Ortalama									920.5

Tablo 4.21. Koşullandırılmış numunelerin çekme dayanımı oranı deney sonuçları

SBS İçeriği (%)	Uçucu Kül İçeriği (%)	Numune No	h _{ort} (mm)	Havadaki Ağırlık (gr)	Sudaki Ağırlık (gr)	Doygun Kuru Yüzey Ağırlık (gr)	Vakum Sonrası (gr)	Dp	Dt	Boşluk (%)	Doygunluk Derecesi (%)	Maksimum Yük (kN)	Çekme Dayanımı (kPa)
0	0	1	67.0	1248.37	710.49	1259.51	1278.92	2.274	2.450	7.19	77.4	5.12	486.7
		2	66.9	1249.43	709.44	1258.43	1279.07	2.276		7.11	76.0	5.01	477.0
		3	66.8	1249.94	710.15	1258.19	1278.65	2.281		6.91	75.8	4.79	456.7
		Ortalama											473.5
	2	4	67.1	1250.7	709.84	1260.84	1279.77	2.270	2.440	6.97	75.7	5.13	487.0
		5	67	1251.05	710.45	1260.73	1280.19	2.273		6.82	77.6	5.12	486.7
		6	66.8	1249.37	709.37	1259.37	1277.69	2.272		6.90	74.6	5.39	513.9
		Ortalama											495.9
	4	7	66.9	1249.13	708.16	1258.11	1275.37	2.271	2.430	6.53	73.1	5.68	540.8
		8	67.2	1248.28	707.73	1259.18	1277.81	2.264		6.85	78.2	5.21	493.8
		9	67.1	1249.56	708.31	1259.29	1276.58	2.268		6.67	73.5	5.96	565.7
		Ortalama											533.5
	6	10	67.4	1250.94	706.11	1259.31	1279.55	2.261	2.420	6.56	78.9	6.99	660.6
		11	67.2	1249.96	703.38	1260.2	1281.34	2.245		7.24	77.9	6.86	650.2
		12	67.2	1249.81	705.71	1259.19	1276.93	2.258		6.69	73.2	6.51	617.0
		Ortalama											642.6
3	0	13	67.3	1256.56	709.95	1265.91	1285.47	2.260	2.439	7.33	70.9	6.53	618.0
		14	67.2	1257.38	711.73	1268.07	1287.7	2.260		7.34	74.3	6.55	620.8
		15	67.4	1257.98	715.07	1268.84	1287.25	2.272		6.86	77.0	6.44	608.6
		Ortalama											615.8
	2	16	67.3	1257.15	709.23	1267.72	1289.43	2.251	2.429	7.33	78.9	7.21	682.4
		17	67.2	1257.43	709.11	1268.15	1287.97	2.249		7.40	73.8	6.95	658.7
		18	67.2	1256.29	712.92	1266.61	1284.03	2.269		6.59	76.0	7.09	672.0
		Ortalama											671.0

Tablo 4.21. Koşullandırılmış numunelerin çekme dayanımı oranı deney sonuçları (devamı)

SBS İçeriği (%)	Uçucu Kül İçeriği (%)	Numune No	h _{ort} (mm)	Havadaki Ağırlık (gr)	Sudaki Ağırlık (gr)	Doygun Kuru Yüzey Ağırlık (gr)	Vakum Sonrası (gr)	Dp	Dt	Boşluk (%)	Doygunluk Derecesi (%)	Maksimum Yük (kN)	Çekme Dayanımı (kPa)
3	4	19	67.5	1254.84	705.91	1265.57	1286.73	2.242	2.419	7.31	77.9	7.29	687.9
		20	67.4	1255.19	708.51	1266.6	1285.94	2.249		7.02	78.4	7.63	721.0
		21	67.3	1256.02	709.47	1266.35	1285.13	2.255		6.76	77.3	7.47	707.0
		Ortalama											705.3
	6	22	67.6	1253.97	704.74	1264.71	1283.19	2.239	2.409	7.04	74.1	7.69	724.6
		23	67.5	1254.66	706.49	1265.16	1282.34	2.246		6.77	73.1	7.85	740.7
		24	67.3	1255.17	703.61	1266.21	1286.52	2.231		7.39	75.4	7.97	754.3
		Ortalama											739.9
6	0	25	67.3	1257.06	709.9	1268.14	1287.22	2.252	2.433	7.45	72.6	7.23	684.3
		26	67.3	1256.72	710.82	1265.25	1285.81	2.267		6.84	76.8	7.46	706.0
		27	67.2	1257.19	710.64	1266.57	1287.5	2.261		7.05	77.3	7.49	709.9
		Ortalama											700.1
	2	28	67.2	1256.91	709.36	1266.12	1285.59	2.258	2.423	6.83	75.4	7.68	727.9
		29	67.4	1257.23	710.22	1267.92	1286	2.254		6.96	74.1	8.11	766.4
		30	67.1	1257.99	710.76	1267.07	1287.35	2.261		6.67	79.1	7.25	688.2
		Ortalama											727.5
	4	31	67.5	1255.02	706.97	1266.72	1284.45	2.242	2.413	7.08	74.2	7.82	737.9
		32	67.3	1255.83	707.09	1265.81	1285.27	2.248		6.85	76.9	8.17	773.2
		33	67.2	1256.49	707.18	1266.38	1285.71	2.247		6.88	75.9	8.00	758.3
		Ortalama											756.5
	6	34	67.4	1255.93	704.19	1266.26	1286.73	2.234	2.403	7.01	78.1	8.45	798.5
		35	67.6	1256.06	704.6	1265.95	1285.15	2.238		6.88	75.3	8.67	816.9
		36	67.4	1256.6	703.79	1266.77	1285.99	2.232		7.11	73.4	9.1	860.0
		Ortalama											825.1

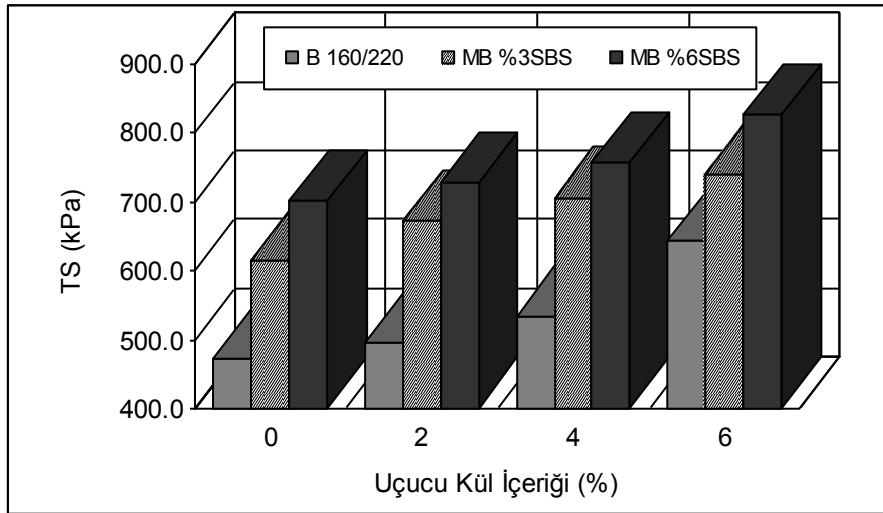


Şekil 4.19. Koşullandırılmamış numunelerin TS değerlerinin SBS ve uçucu kül içeriği ile değişimi

Şekil 4.19’de görüldüğü üzere hem SBS hem de uçucu kül kullanımı ile koşullandırmadan önce çekme dayanımı değerleri artmıştır. B 160/220 bitümü ile hazırlanan karışımlarda filler olarak tamamen kalker kullanılan karışıma göre filler olarak %4 oranında uçucu kül içeren karışımın çekme dayanımı değeri %6.9, %6 uçucu kül kullanılan karışımın TS değeri ise %26.5 daha yüksek çıkmıştır. MB_{%3SBS} bitümü ile hazırlanan karışımlarda uçucu kül içermeyen karışıma göre filler olarak %2 uçucu kül içeren karışımın TS değeri %8.0, %4 uçucu kül içeren karışımın TS değeri %13.8 ve %6 uçucu kül içeren karışımın TS değeri ise %16.1 daha yüksek çıkmıştır. MB_{%6SBS} bitümü ile hazırlanan karışımlarda uçucu kül içermeyen karışıma göre filler olarak %4 uçucu kül içeren karışımın TS değeri %4.8 ve %6 uçucu kül içeren karışımın TS değeri ise %11.3 daha yüksek çıkmıştır. Bu durum koşullandırılmamış karışımlarda SBS kullanılmayan saf bağlayıcı ile hazırlanan karışımlarda uçucu külün TS değerleri üzerinde daha etkin olduğunu, bağlayıcı modifikasyonundaki SBS oranı arttıkça uçucu külün etkisinin azaldığını göstermektedir.

Koşullandırılmış karışımların çekme dayanımlarının görüldüğü Şekil 4.20 incelendiğinde koşullandırılmamış karışımlarda olduğu gibi hem SBS hem de uçucu kül kullanımı ile çekme dayanımlarının arttığı tespit edilmiştir. B 160/220 bitümü ile hazırlanan karışımlarda filler olarak tamamen kalker kullanılan karışıma göre filler olarak %4 oranında uçucu kül içeren karışımın çekme dayanımı değeri %12.7, %6 uçucu kül kullanılan karışımın TS değeri ise %35.7 daha yüksek çıkmıştır. MB_{%3SBS} bitümü ile

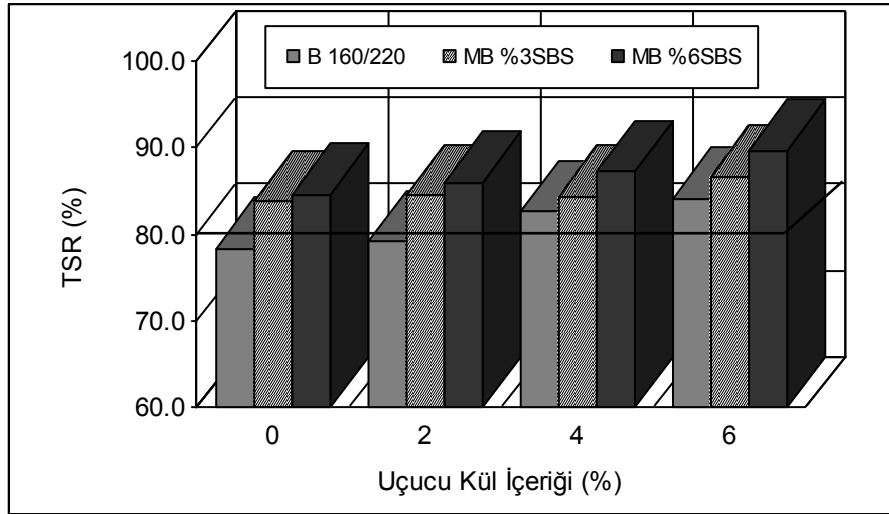
hazırlanan karışımlarda uçucu kül içermeyen karışıma göre filler olarak %2 uçucu kül içeren karışımın TS değeri %9.0, %4 uçucu kül içeren karışımın TS değeri %14.5 ve %6 uçucu kül içeren karışımın TS değeri ise %20.1 daha yüksek çıkmıştır. MB_{%6SBS} bitümü ile hazırlanan karışımlarda uçucu kül içermeyen karışıma göre filler olarak %4 uçucu kül içeren karışımın TS değeri %8.1 ve %6 uçucu kül içeren karışımın TS değeri ise %17.9 daha yüksek çıkmıştır. Elde edilen sonuçlardan koşullandırılmamış karışımlarda olduğu gibi saf bağlayıcı (B 160/220) ile hazırlanan karışımlarda uçucu külün TS değerleri üzerinde daha etkin olduğunu, bağlayıcı modifikasyonundaki SBS oranı arttıkça uçucu külün etkisinin azaldığı belirlenmiştir. Ayrıca koşullandırma sonrasında SBS ve uçucu külün etkisinin arttığı tespit edilmiştir.



Şekil 4.20. Koşullandırılmış numunelerin TS değerlerinin SBS ve uçucu kül içeriği ile değişimi

SBS ve uçucu külün etkisi değerlendirildiğinde diğer deney sonuçlarında olduğu gibi SBS'in daha etkin olduğu belirlenmiştir. SBS içermeyen ve filler olarak %6 oranında uçucu kül içeren karışımın çekme dayanım değerlerinin hem koşullandırma işleminden önce hem de sonraki çekme dayanımı değerlerinin MB_{%3SBS} bitümü ile hazırlanan ve uçucu kül içermeyen karışımlarla benzer olduğu belirlenmiştir.

Koşullandırılmış karışımların çekme dayanımı değerlerinin koşullandırılmamış karışımların çekme dayanımı değerlerine oranlanması ile elde edilen ve bitümlü sıcak karışımların nem hasarına karşı dayanımının bir göstergesi olan çekme dayanımı oranı değerleri incelendiğinde (Şekil 4.21) çekme dayanımı değerlerinde olduğu gibi hem SBS hem uçucu kül içeriği arttıkça karışımların TSR değerlerinin arttığı belirlenmiştir.



Şekil 4.21. Karışımların TSR değerlerinin SBS ve uçucu kül içeriği ile değişimi

Superpave gibi çeşitli şartnamelerde TSR değerinin %80'in üzerinde olması istenmektedir. Elde edilen değerler incelendiğinde B 160/220 bitümü ile hazırlanan ve fillerin tamamı kalkerden oluşan ve filler olarak %2 oranında uçucu kül içeren karışımların TSR değerlerinin %80'in altında olduğu diğer bütün karışımların TSR değerlerinin %80'in üzerinde olduğu belirlenmiştir. Bitüm modifikasyonunda %6 oranında SBS kullanımı ve filler olarak %6 oranında uçucu kül kullanılması ile saf karışıma göre TSR değeri %14.3 oranında artmıştır.

Elde edilen sonuçlardan hem SBS kullanımının hem de uçucu kül kullanımının bitümlü sıcak karışımların nem hasarına karşı dayanımını arttırdığı belirlenmiştir. Uçucu kül ve SBS'in birlikte kullanımı ile nem hasarına karşı dayanımın daha fazla oranda arttığı tespit edilmiştir.

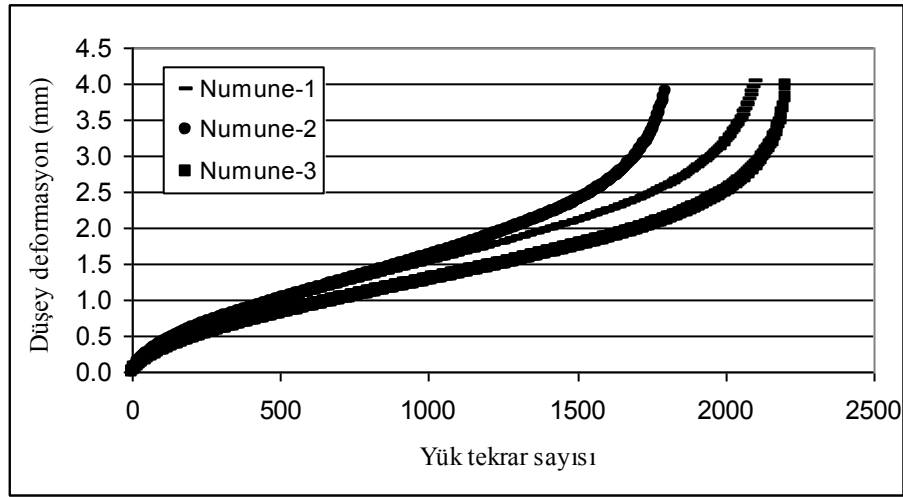
4.3.4. İndirekt Çekme Yorulma Deney Sonuçları

İndirekt çekme yorulma deneyi, saf bağlayıcı, %3 ve %6 oranında SBS içeren ve çeşitli oranlarda (%2, 4 ve 6) uçucu kül içeren 12 farklı bitümlü sıcak karışım numuneleri üzerinde uygulanmıştır. Gerilme kontrollü olarak yapılan deneyde numunelere 300 kPa gerilme uygulanmıştır.

Deney, 25°C sıcaklıkta yapılmıştır. Deneye başlamadan önce numuneler 3 saat deney sıcaklığında bekletilmiştir. Bu süre sonunda numune, yükleme başlıkları arasına

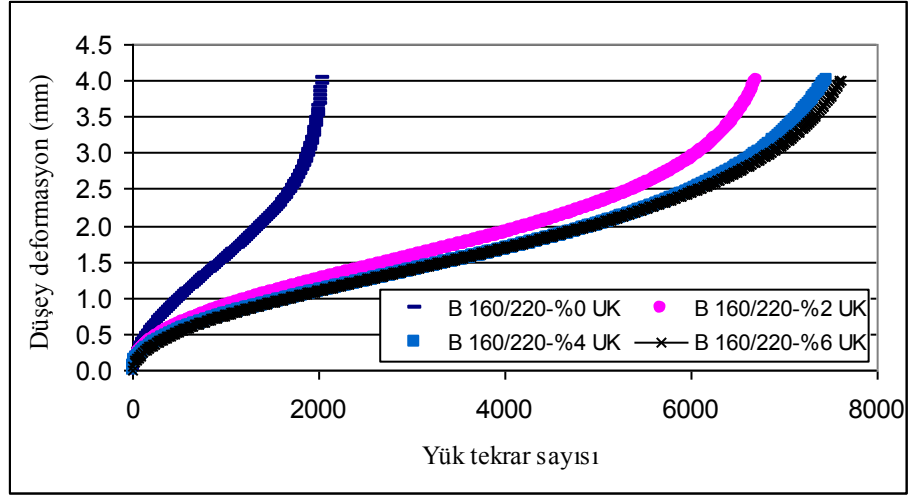
yerleştirilmiş, düşey deformasyonu okuyacak LVDT'ler ayarlanmış, numune yüksekliği, çapı, gerilme seviyesi değerleri ve yükleme periyodu bilgisayara girilmiş ve deneye başlanmıştır. Yükleme periyodu 1,5 sn olarak alınmış bu sürenin 0,124 saniyesi ITSM deneyinde olduğu gibi yük etki süresi olarak ayarlanmıştır. Dolayısıyla dinlenme periyodu (rest period) 1,376 saniye olmuştur. Deney, numuneler tam olarak kırılıncaya kadar devam etmiştir.

Çalışmada her bir karışım türünden üç adet numune indirekt çekme yorulma deneyine tabi tutulmuştur. Üçer numuneden elde edilen değerlerin ortalaması karşılaştırılmıştır. Örnek olarak B 160/220 bitümü ile hazırlanan ve uçucu kül içermeyen karışımların deformasyon- yük tekrar sayısı ilişkileri Şekil 4.22'de verilmiştir.



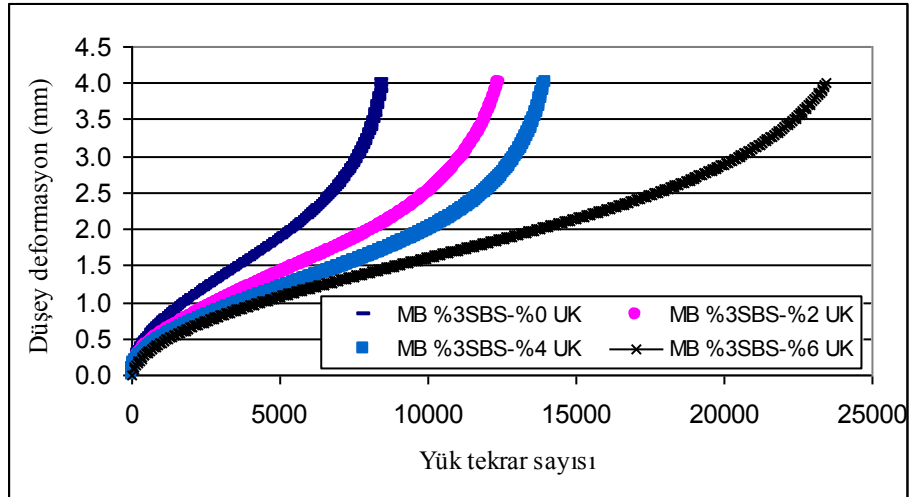
Şekil 4.22. Saf karışımın her üç numunesinin deformasyon-yük tekrar sayısı ilişkisi

Şekil 4.22'de görüldüğü üzere birbirine yakın deney sonuçları değerlendirmeye alınmıştır. Darbe sayıları arasında %25'ten fazla fark olan numuneler değerlendirmeden çıkarılmış standardı sağlamayan numune sayısı kadar yeni numune tekrar deneye tabi tutulmuştur. Çalışmada öncelikle uçucu külün etkisi sonra ise SBS kullanımının etkisi değerlendirilmiştir. B 160/220 bitümü ile hazırlanan ve %0-2-4 ve %6 oranlarında uçucu kül içeren karışımların üçer numunesinin ortalamasından elde edilen yük tekrar sayısı-deformasyon ilişkisi Şekil 4.23'de verilmiştir.



Şekil 4.23. B 160/220 ile hazırlanan karışımların deformasyon-yük tekrar sayısı ilişkisi

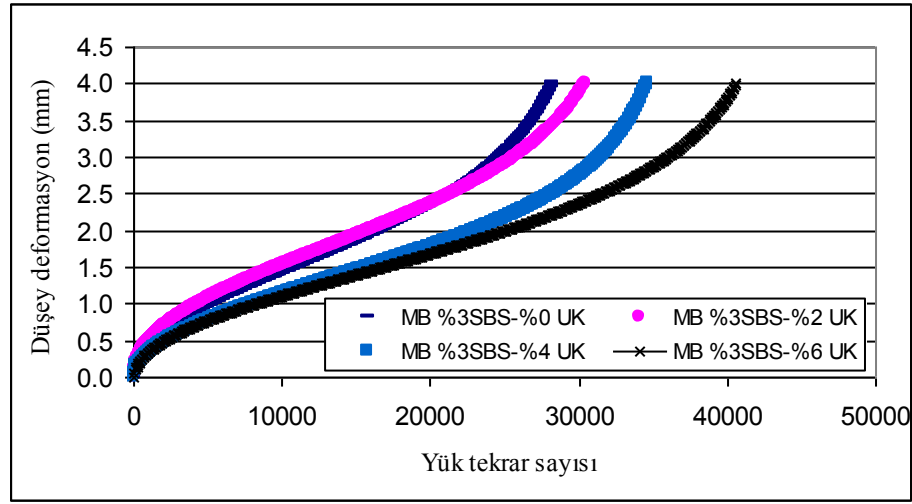
Şekil 4.23’de görüldüğü üzere uçucu kül kullanımı ile B 160/220 bitümü ile hazırlanan karışımların yorulma ömrü önemli oranda artmıştır. Şekil incelendiğinde B 160/220 saf bitümü ile hazırlanan karışımlarda filler olarak %2 oranında uçucu kül kullanımının bile önemli derecede etkin olduğu, %4 ve %6 uçucu kül kullanımının benzer etkiye sahip olduğu görülmektedir. MB_{%3SBS} bitümü ile hazırlanan ve %0-2-4 ve %6 oranlarında uçucu kül içeren karışımların üçer numunesinin ortalamasından elde edilen yük tekrar sayısı-deformasyon ilişkisi Şekil 4.24’de verilmiştir.



Şekil 4.24. MB_{%3SBS} ile hazırlanan karışımların deformasyon-yük tekrar sayısı ilişkisi

MB_{%3SBS} bitümü ile hazırlanan karışımlar incelendiğinde bitüm modifikasyonunda SBS kullanımı ve filler olarak uçucu kül kullanımının karışımların yorulma ömrünü önemli

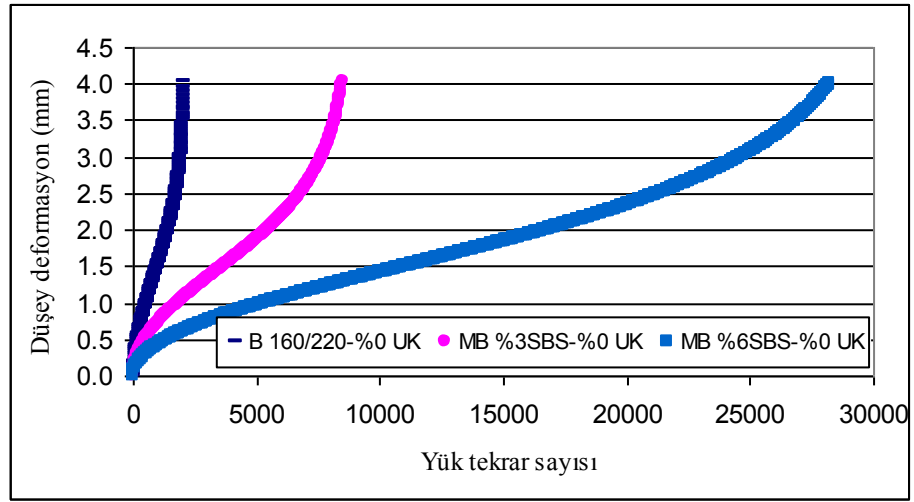
oranda arttırdığı görülmektedir. MB₃SBS bitümü ile hazırlanan karışımlarda filler olarak %2 ve %4 oranlarında uçucu kül kullanılan karışımların benzer değişim gösterdiği, %6 oranında uçucu kül kullanımının ise yorulma ömrünü önemli oranda arttırdığı belirlenmiştir. MB₆SBS bitümü ile hazırlanan ve %0-2-4 ve %6 oranlarında uçucu kül içeren karışımların üçer numunesinin ortalamasından elde edilen yük tekrar sayısı-deformasyon ilişkisi Şekil 4.25’de verilmiştir.



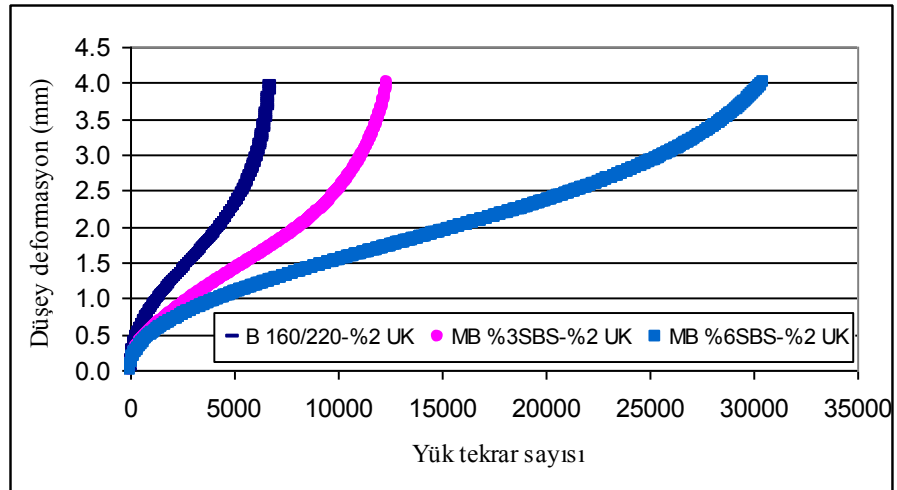
Şekil 4.25. MB₃SBS ile hazırlanan karışımların deformasyon-yük tekrar sayısı ilişkisi

MB₆SBS bitümü ile hazırlanan ve değişik oranlarda uçucu kül içeren karışımlar değerlendirildiğinde filler olarak %2 oranında uçucu kül kullanımının yorulma ömrünü önemli oranda arttırmadığı, %4 ve özellikle %6 oranında uçucu kül kullanımının daha etkin olduğu belirlenmiştir. SBS’in karışımların yorulma ömürleri üzerindeki etkilerini değerlendirmek amacıyla aynı uçucu kül içeriğine sahip karışımların yorulma ömürleri karşılaştırılmıştır. Farklı oranlarda (%0-2-4 ve 6) uçucu kül içeren ve B 160/220, MB₃SBS, MB₆SBS bitümleri ile hazırlanan karışımların yorulma ömürleri Şekil 4.26-29’da görülmektedir.

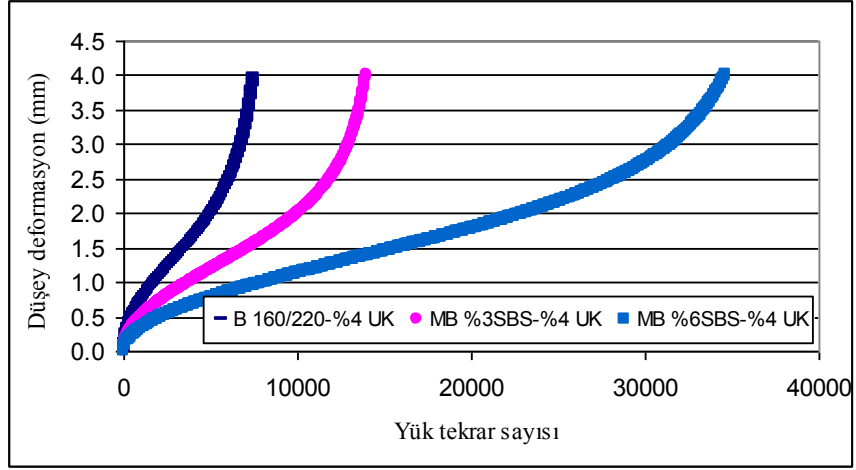
Şekil 4.26-29’da görülen farklı oranlarda uçucu kül içeren karışımların yorulma ömürleri değerlendirildiğinde hem %3 hem de %6 oranında SBS kullanımının karışımların yorulma ömürlerini önemli oranda arttırdığı belirlenmiştir.



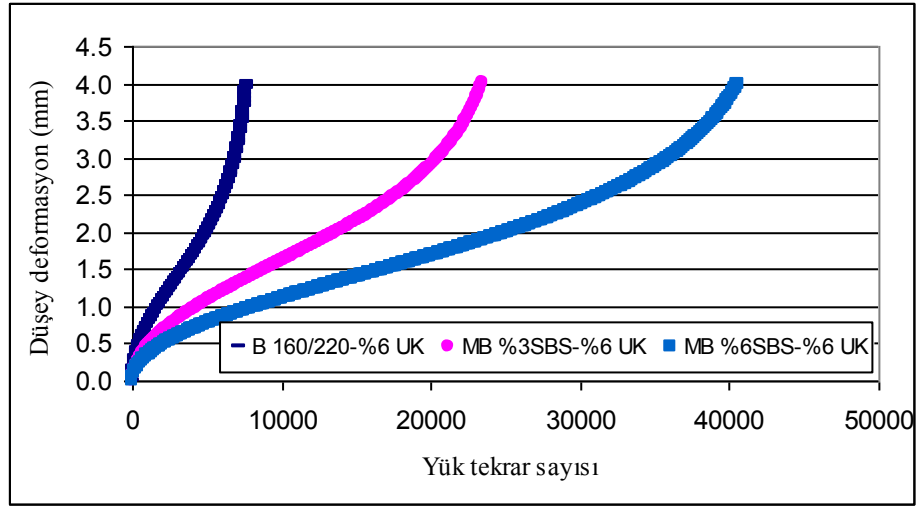
Şekil 4.26. Uçucu kül içermeyen karışımların deformasyon-yük tekrar sayısı ilişkisi



Şekil 4.27 Filler olarak %2 oranında uçucu kül içeren karışımların deformasyon-yük tekrar sayısı ilişkisi



Şekil 4.28. Filler olarak %4 oranında uçucu kül içeren karışımların deformasyon-yük tekrar sayısı ilişkisi

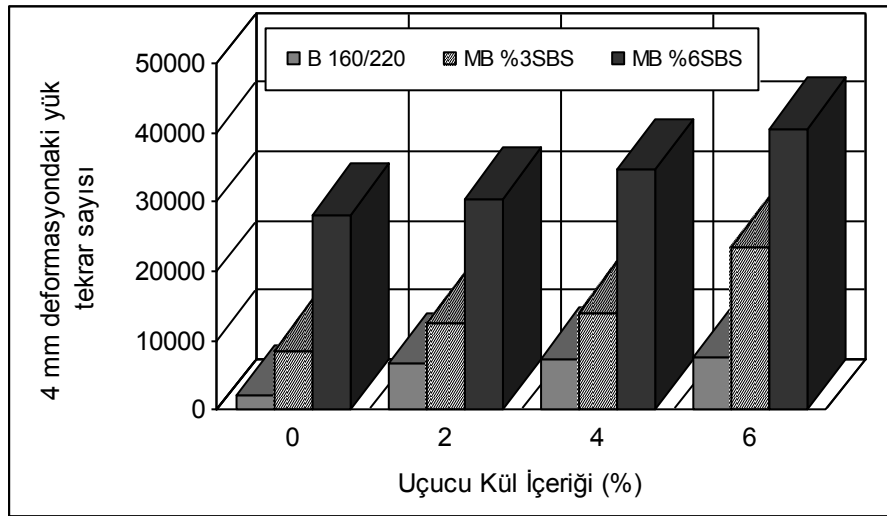


Şekil 4.29. Filler olarak %6 oranında uçucu kül içeren karışımların deformasyon-yük tekrar sayısı ilişkisi

Grafikler yük tekrar sayısında meydana gelen deformasyon değerlerini gösteren noktalardan oluşmuştur. Detaylı bir karşılaştırma yapabilmek için çalışmada iki farklı parametre belirlenerek, tek bir noktadaki değerler karşılaştırılmıştır. Öncelikle bütün karışımlar için 4 mm deformasyona neden olan yük tekrar sayıları değerlendirilmiştir. İkinci parametre olarak bütün karışımların en az darbe alan saf karışımın yük tekrar sayısındaki (2037) deformasyon miktarları değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar Tablo 4.22’de ve Şekil 4.30 ve 4.31’de verilmiştir.

Tablo 4.22. Yorulma deney sonuçları

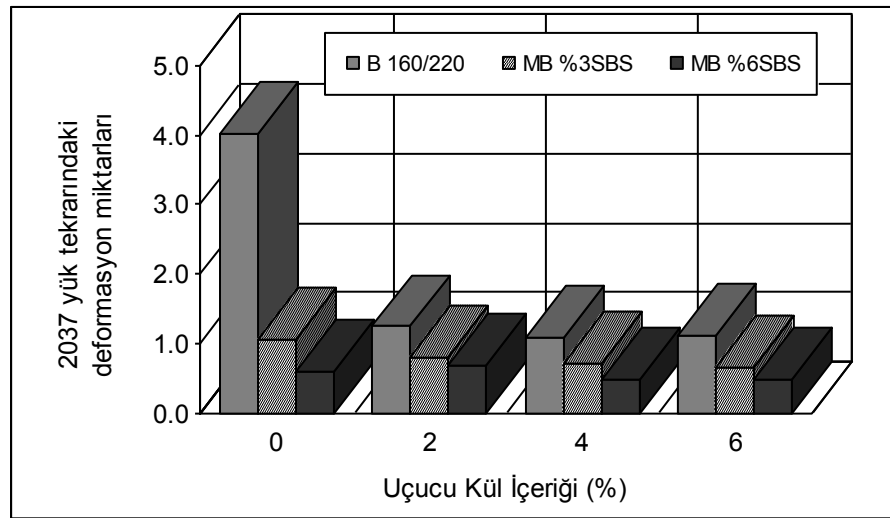
SBS İçeriği (%)	Uçucu Kül İçeriği (%)	4 mm def.'daki yük tekrar sayısı	2037 yük tekrarındaki deformasyon miktarları
0	0	2037	4.000
	2	6705	1.255
	4	7458	1.098
	6	7605	1.114
3	0	8478	1.061
	2	12405	0.805
	4	13959	0.714
	6	23454	0.664
6	0	28224	0.615
	2	30441	0.696
	4	34617	0.488
	6	40581	0.483

**Şekil 4.30.** Karışımların 4 mm deformasyondaki yük tekrar sayıları

Şekil 4.30’da görülen karışımların 4 mm deformasyondaki yük tekrar sayıları incelendiğinde hem SBS hem de uçucu kül kullanımı ile yük tekrar sayılarının arttığı belirlenmiştir. B 160/220 bitümü ile hazırlanan karışımlarda %4 ve %6 oranında uçucu kül kullanılması durumunda yük tekrar sayısı 3.7 kat artmıştır. MB%3SBS bitümü ile hazırlanan karışımlarda %4 oranında uçucu kül kullanılması durumunda yük tekrar sayısı 1.6 kat, %6

uçucu kül kullanılması durumunda 2.8 kat oranında artmıştır. MB%6SBS bitümü ile hazırlanan karışımlarda %4 oranında uçucu kül kullanılması durumunda yük tekrar sayısı 1.2 kat, %6 uçucu kül kullanılması durumunda 1.4 kat oranında artmıştır. Elde edilen sonuçlardan uçucu külün SBS ile birlikte kullanımında bitüm modifikasyonundaki SBS içeriği arttıkça uçucu külün yük tekrar sayısı üzerindeki etkinliğinin azaldığı belirlenmiştir.

Uçucu kül içermeyen karışımlarda bitüm modifikasyonunda %3 oranında SBS kullanılması ile yük tekrar sayısının 4.2 kat, %6 SBS kullanımı ile 13.9 kat arttığı belirlenmiştir. Filler yerine %2, %4 ve %6 oranlarında uçucu kül içeren karışımlarda %3 oranında SBS kullanılması ile yük tekrar sayısının sırasıyla 1.9, 1.9 ve 3.1 kat, %6 SBS kullanımı ile sırasıyla 4.5, 4.6 ve 5.3 kat arttığı belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlardan SBS'in uçucu kül içermeyen karışımlar üzerinde daha etkin olduğu belirlenmiştir. Ayrıca bütün sonuçlar değerlendirildiğinde yük tekrar sayıları üzerinde SBS'in uçucu küle göre daha etkin olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.31. Karışımların 2037 yük tekrarındaki deformasyon miktarları

Bütün karışımlar değerlendirildiğinde tekrar yükler sonucu en erken bozulmanın B 160/220 saf bitümü ile hazırlanan ve uçucu kül içermeyen karışımlarda (ortalama 2037 yük tekrar sayısında) meydana geldiği belirlenmiştir. Saf karışımda 2037 yük tekrarında 4.03 mm deformasyon olduğu belirlenmiştir. Karışımdaki SBS ve uçucu kül içerikleri arttıkça deformasyon değerlerinin azaldığı belirlenmiştir (Şekil 4.31).

B 160/220 bitümü ile hazırlanan karışımlarda %4 ve %6 oranında uçucu kül kullanılması durumunda 2037 yük tekrar sayısındaki deformasyon miktarı 3.6 kat

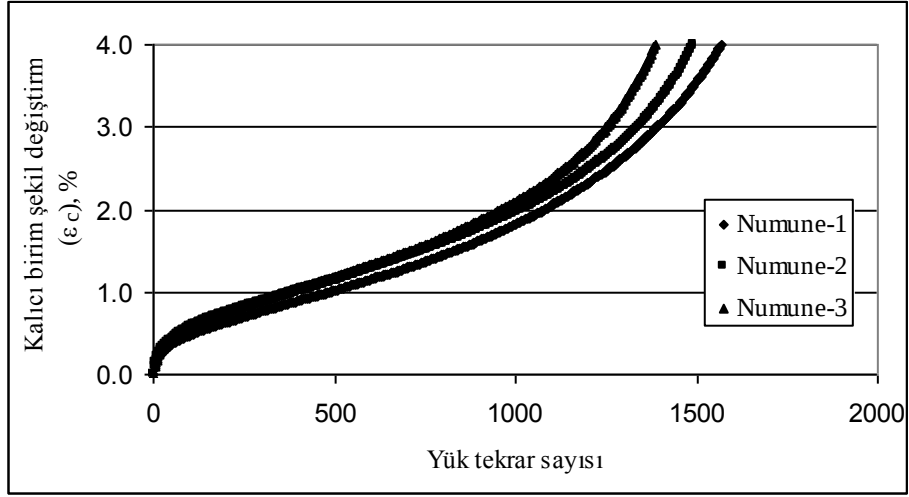
azalmıştır. MB_{3SBS} bitümü ile hazırlanan karışımlarda %4 ve %6 oranlarında uçucu kül kullanılması durumunda 2037 yük tekrar sayısındaki deformasyon miktarı uçucu kül kullanılmayan karışımlara göre yaklaşık 1.6 kat azalmıştır. MB_{6SBS} bitümü ile hazırlanan karışımlarda %4 ve %6 oranlarında uçucu kül kullanılması durumunda 2037 yük tekrar sayısındaki deformasyon miktarı uçucu kül kullanılmayan karışımlara göre yaklaşık 1.3 kat azalmıştır.

Uçucu kül içermeyen karışımlarda bitüm modifikasyonunda %3 oranında SBS kullanılması ile 2037 yük tekrar sayısındaki deformasyon miktarı 3.8 kat, %6 SBS kullanımı ile 6.6 kat azaldığı belirlenmiştir. Filler yerine %2, %4 ve %6 oranlarında uçucu kül içeren karışımlarda %3 oranında SBS kullanılması ile yük tekrar sayısının sırasıyla 1.6, 1.5 ve 1.7 kat, %6 SBS kullanımı ile sırasıyla 1.8, 2.3 ve 2.3 kat azaldığı belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlardan hem SBS'in hem de uçucu külün deformasyon miktarlarını azalttığı, SBS ve uçucu külün birlikte kullanımı ile deformasyon miktarlarında daha fazla azalma meydana geldiği tespit edilmiştir.

4.3.5. Dinamik Sünme Deney Sonuçları

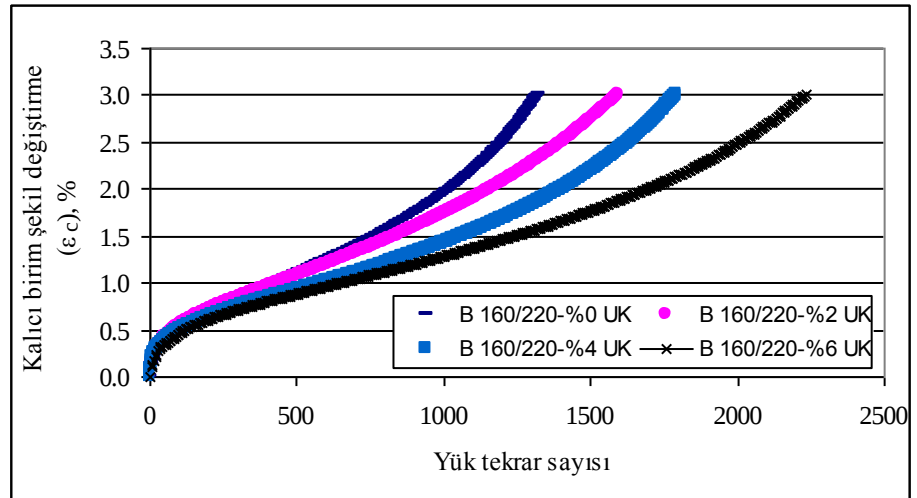
Dinamik sünme deneyi, bağlayıcı modifikasyonunda değişik oranlarda SBS içeren ve karışım modifikasyonunda değişik oranlarda uçucu kül içeren 12 farklı bitümlü sıcak karışım türü üzerinde UMATTA deney aleti kullanılarak uygulanmıştır. Deney 50°C sıcaklıkta yapılmıştır. Deneye başlamadan önce numuneler 4 saat deney sıcaklığında bekletilmiştir. Bu süre sonunda numune, deney aparatına yerleştirilmiş, düşey deformasyonu okuyacak LVDT'ler ayarlanmış, numune yüksekliği, çapı, gerilme seviyesi değerleri ve yükleme periyodu bilgisayara girilmiş ve deneye başlanmıştır. Deneye başlanmadan önce numunelere 90 saniye süresince 10 kPa gerilme altında statik bir ön yükleme yapılmıştır. Dinamik sünme deneyi 500 kPa gerilme altında gerçekleşmiştir. Yükleme periyodu 1.0 sn olarak alınmıştır. Bu sürenin 500 ms.'si yük etki süresi, 500 ms.'si ise dinlenme süresi olarak seçilmiştir. Deneylere numunelerde bozulma meydana gelinceye kadar devam edilmiştir.

Çalışmada her bir karışım türünden üçer adet numune dinamik sünme deneyine tabi tutulmuştur. Üçer numuneden elde edilen değerlerin ortalaması karşılaştırılmıştır. Örnek olarak B 160/220 bitümü ile hazırlanan ve uçucu kül içermeyen karışımların birim şekil değiştirme- yük tekrar sayısı ilişkileri Şekil 4.32'de verilmiştir.

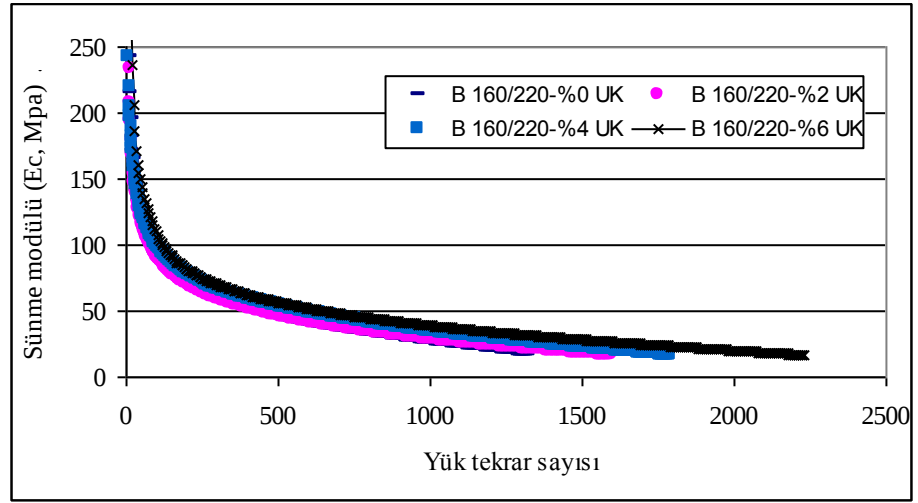


Şekil 4.32. Saf karışımın her üç numunesinin ϵ_c -yük tekrar sayısı ilişkisi

Şekil 4.32’de görüldüğü üzere birbirine yakın deney sonuçları değerlendirmeye alınmıştır. Darbe sayıları arasında %25’ten fazla fark olan numuneler değerlendirmeden çıkarılmış standardı sağlamayan numune sayısı kadar yeni numune tekrar deneye tabi tutulmuştur. Çalışmada öncelikle uçucu külün etkisi sonra ise SBS kullanımının etkisi değerlendirilmiştir. B 160/220 bitümü ile hazırlanan ve %0-2-4 ve %6 oranlarında uçucu kül içeren karışımların üçer numunesinin ortalamasından elde edilen kalıcı birim şekil değiştirme-yük tekrar sayısı ilişkisi Şekil 4.33’de, sünme modülü-yük tekrar sayısı ilişkisi ise Şekil 4.34’de verilmiştir. Şekil 4.33’de görüldüğü üzere B 160/220 bitümü ile hazırlanan karışımlarda filler olarak kullanılan uçucu kül içeriği arttıkça aynı kalıcı birim şekil değiştirmeye neden olan yük tekrar sayıları artmıştır.



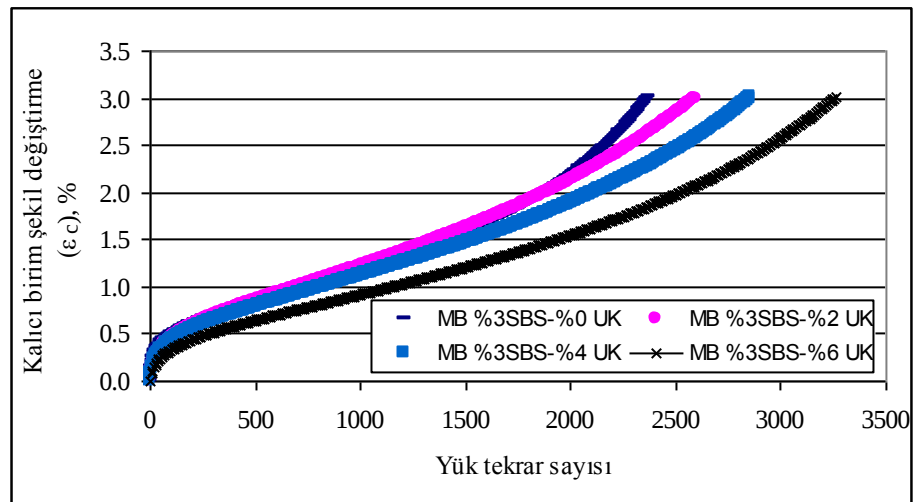
Şekil 4.33. B 160/220 ile hazırlanan karışımların ϵ_c -yük tekrar sayısı ilişkisi



Şekil 4.34. B 160/220 ile hazırlanan karışımların E_c -yük tekrar sayısı ilişkisi

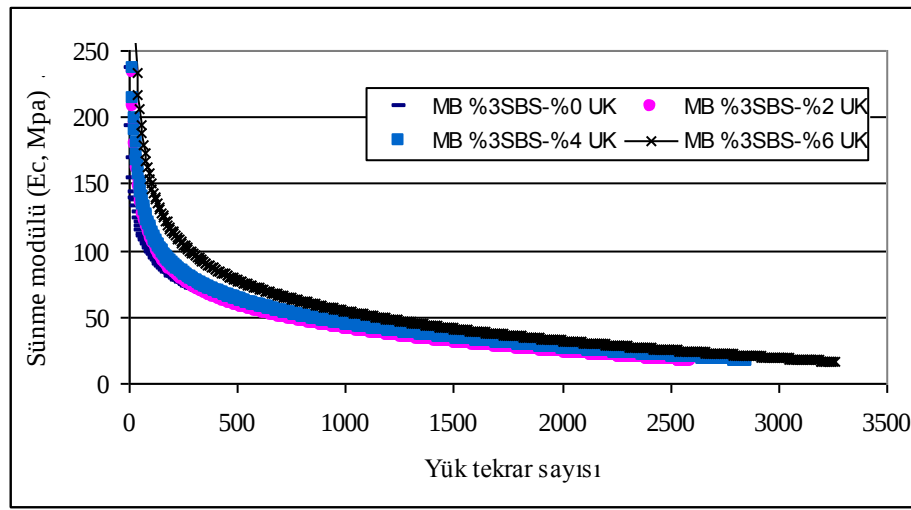
Deformasyonlardan elde edilen sünme modülü değerleri incelendiğinde ise (Şekil 4.34) konsolidasyondan kaynaklanan ilk 200 darbesine kadar sünme modüllerinde aşırı bir azalma olduğu, daha sonra ise darbe sayısı arttıkça sünme modüllerinde daha düşük bir azalmanın meydana geldiği belirlenmiştir. %3 kalıcı birim şekil değiştirme değerleri dikkate alındığında aynı sünme modülüne ulaşmak için uçucu kül içeren karışımlara daha fazla yük tekrarı uygulanması gerektiği görülmektedir.

MB_{%3SBS} bitümü ile hazırlanan ve %0-2-4 ve %6 oranlarında uçucu kül içeren karışımların üçer numunesinin ortalamasından elde edilen kalıcı birim şekil değiştirme-yük tekrar sayısı ilişkisi Şekil 4.35’de, sünme modülü-yük tekrar sayısı ilişkisi ise Şekil 4.36’te verilmiştir.



Şekil 4.35. MB_{%3SBS} bitümü ile hazırlanan karışımların ϵ_c -yük tekrar sayısı ilişkisi

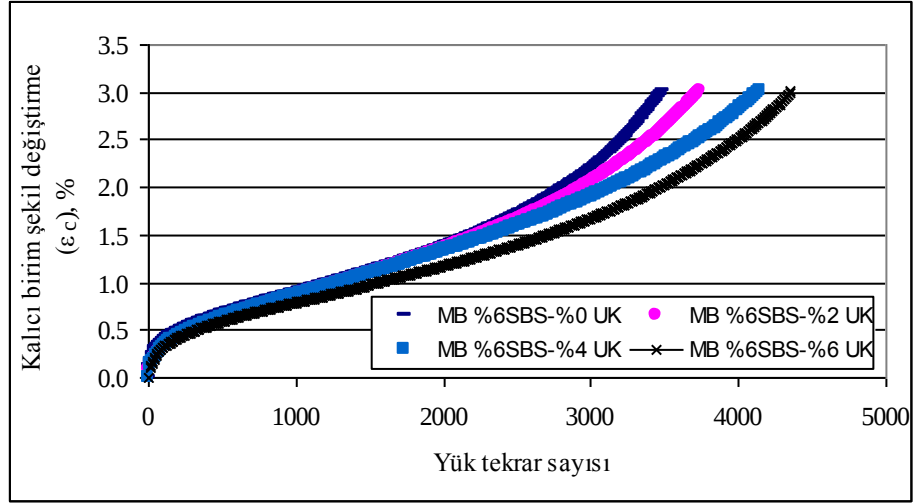
Şekil 4.35’de görüldüğü üzere B 160/220 bitümü ile hazırlanan karışımlarda olduğu gibi MB%3SBS bitümü ile hazırlanan karışımlarda da filler yerine kullanılan uçucu kül içeriği arttıkça aynı kalıcı birim şekil değiştirmeye neden olan yük tekrar sayıları artmıştır. %3 kalıcı birim şekil değiştirmeye neden olan en az yük tekrar sayısının uçucu kül içermeyen karışımda olduğu, en yüksek yük tekrar sayısının ise %6 uçucu kül içeren karışımda olduğu tespit edilmiştir. Kalıcı birim şekil değiştirme değerlerine bağlı olarak uçucu kül içeren karışımların sünme modülü değerlerinin uçucu kül içermeyen karışımlara göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir.



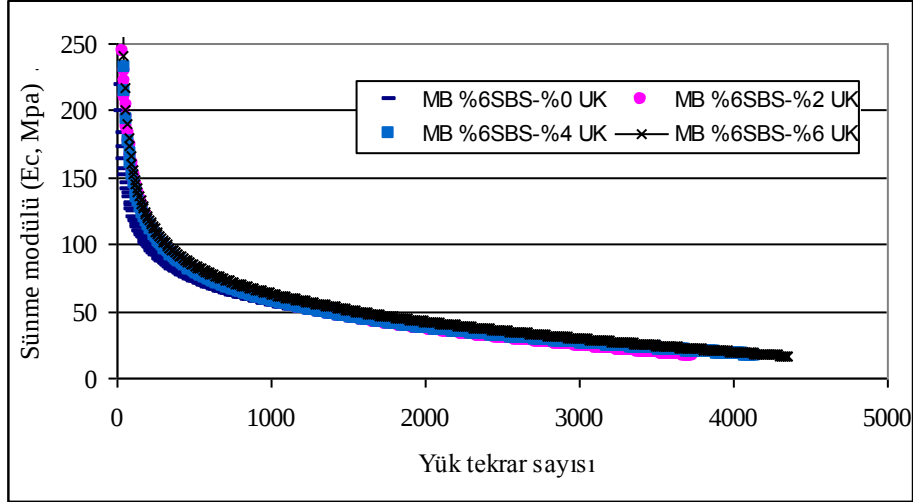
Şekil 4.36. MB%3SBS bitümü ile hazırlanan karışımların E_c -yük tekrar sayısı ilişkisi

MB%6SBS bitümü ile hazırlanan ve %0-2-4 ve %6 oranlarında uçucu kül içeren karışımların üçer numunesinin ortalamasından elde edilen kalıcı birim şekil değiştirme-yük tekrar sayısı ilişkisi Şekil 4.37’de, sünme modülü-yük tekrar sayısı ilişkisi ise Şekil 4.38’de verilmiştir.

MB%6SBS bitümü ile hazırlanan karışımlar değerlendirildiğinde diğer bağlayıcılarda olduğu gibi filler yerine kullanılan uçucu kül içeriği arttıkça aynı kalıcı birim şekil değiştirmeye neden olan yük tekrar sayılarının arttığı tespit edilmiştir. MB%6SBS bitümü ile hazırlanan karışımlarda aynı kalıcı birim şekil değiştirmeye neden olan en düşük yük tekrar sayılarının uçucu kül içermeyen karışımlarda, en yüksek yük tekrar sayılarının ise %6 uçucu kül içeren karışımlarda olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.37. MB%6SBS bitümü ile hazırlanan karışımların ϵ_c -yük tekrar sayısı ilişkisi

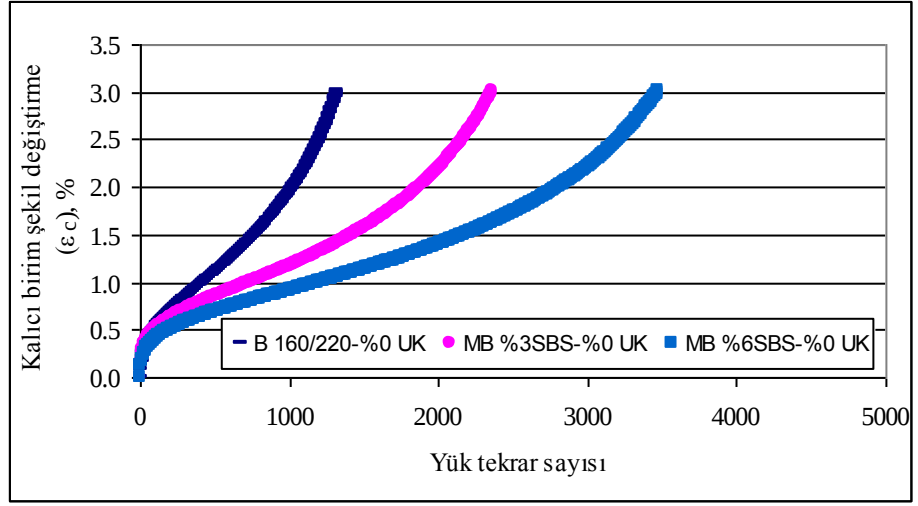


Şekil 4.38. MB%6SBS bitümü ile hazırlanan karışımların E_c -yük tekrar sayısı ilişkisi

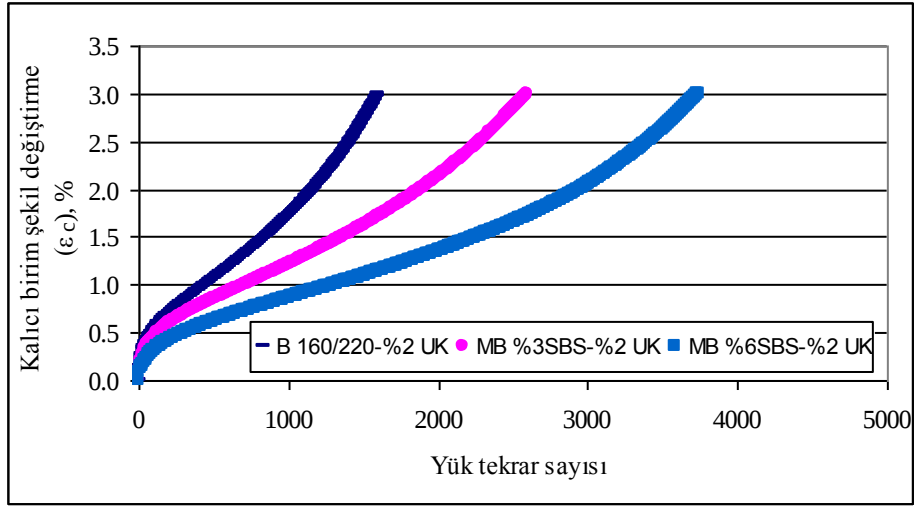
Şekil 4.38 incelendiğinde kalıcı birim şekil değiştirmelere bağlı olarak sünme modülü değerlerinin uçucu kül içeriği arttıkça arttığı, fakat uçucu kül içeren karışımların sünme modülü değerlerinin birbirine yakın olduğu tespit edilmiştir.

Farklı oranlarda (%0-2-4 ve 6) uçucu kül içeren ve B 160/220, MB%3SBS, MB%6SBS bitümleri ile hazırlanan karışımların kalıcı birim şekil değiştirme değerlerinin yük tekrarı ile değişimleri Şekil 4.39-42’de görülmektedir.

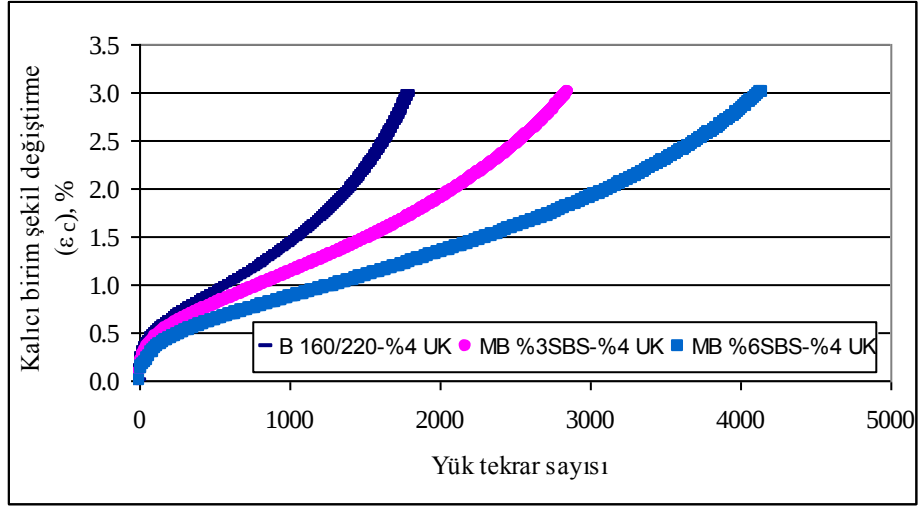
Şekil 4.39-42 incelendiğinde bitüm modifikasyonunda kullanılan SBS içeriği arttıkça aynı kalıcı birim şekil değiştirmeye neden olan yük tekrar sayılarının önemli oranda arttığı tespit edilmiştir. Elde edilen grafiklerden SBS’in uçucu küle göre daha etkin olduğu görülmektedir.



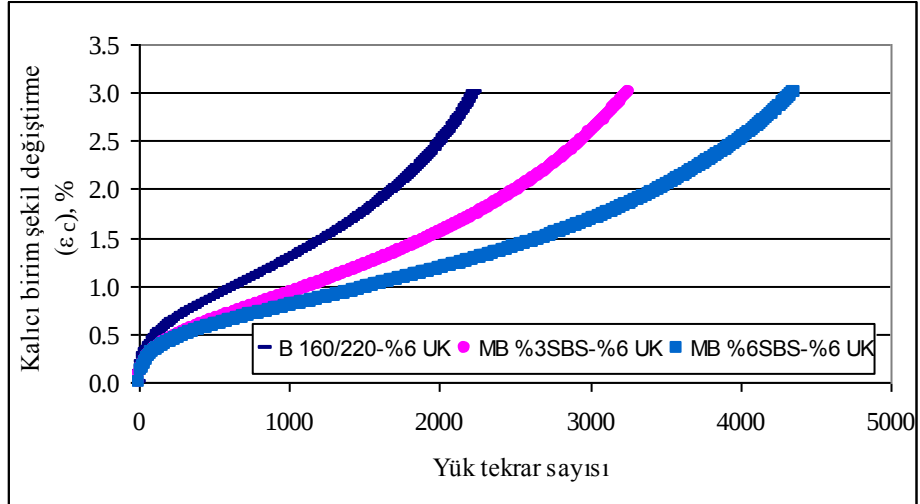
Şekil 4.39. Uçucu kül içermeyen karışımların ϵ_c -yük tekrar sayısı ilişkisi



Şekil 4.40. Filler olarak %2 oranında uçucu kül içeren karışımların ϵ_c -yük tekrar sayısı ilişkisi



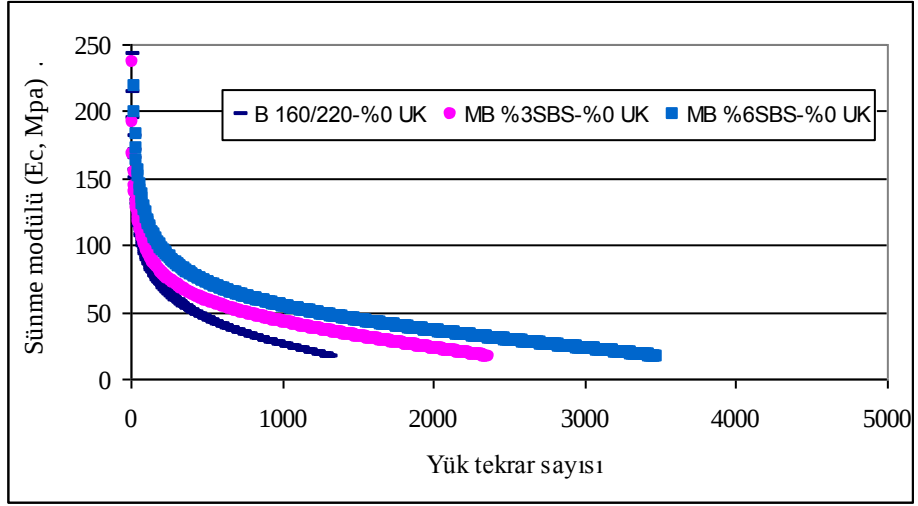
Şekil 4.41. Filler olarak %4 oranında uçucu kül içeren karışımların ϵ_c -yük tekrar sayısı ilişkisi



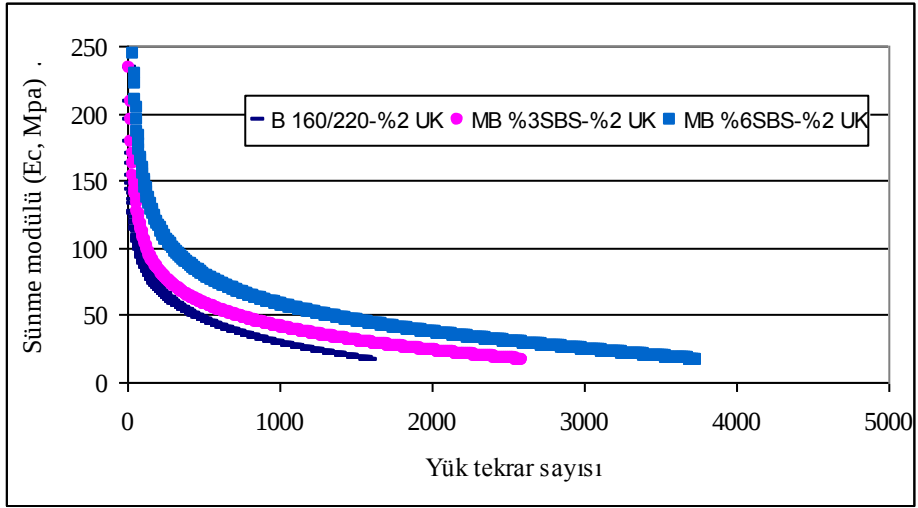
Şekil 4.42. Filler olarak %6 oranında uçucu kül içeren karışımların ϵ_c -yük tekrar sayısı ilişkisi

Farklı oranlarda (%0-2-4 ve 6) uçucu kül içeren ve B 160/220, MB%3SBS, MB%6SBS bitümleri ile hazırlanan karışımların Sünme modülü (E_c) değerlerinin yük tekrarı ile değişimleri Şekil 4.43-46'te görülmektedir.

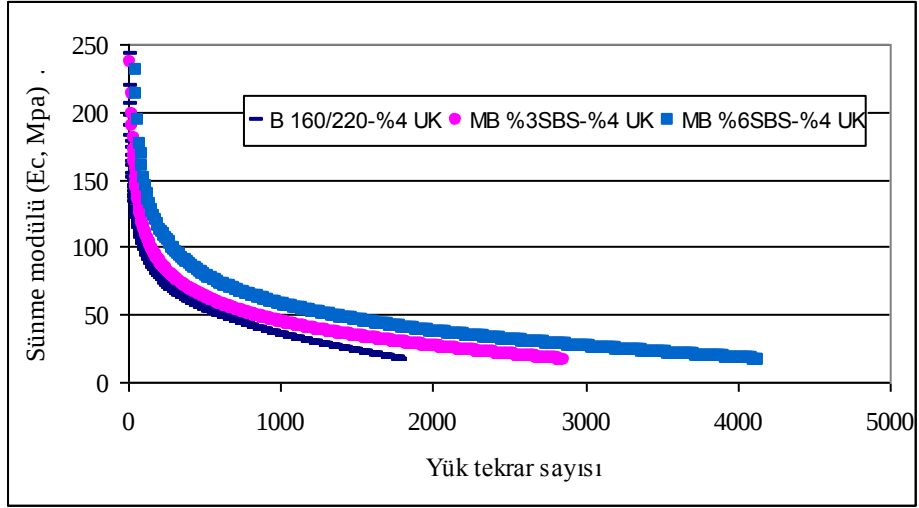
Şekillerde görüldüğü son kalıcı birim şekil değiştirme değerleri aynı olduğundan (%3) son sünme modülü değerleri eşit olmalarına rağmen yük tekrar sayılarındaki sünme modülü değerleri incelendiğinde SBS içeriği arttıkça sünme modülü değerlerinin arttığı dolayısıyla bitümlü sıcak karışımların kalıcı deformasyona karşı dayanımlarının arttığı tespit edilmiştir.



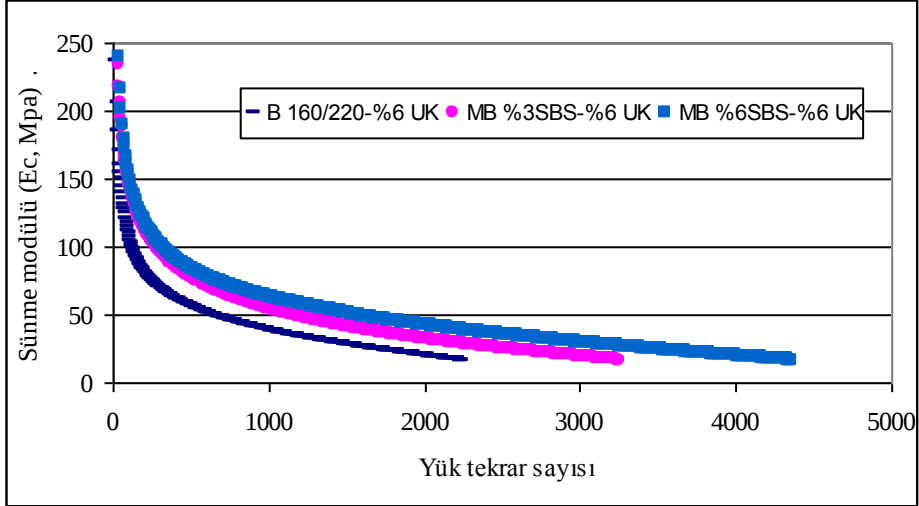
Şekil 4.43. Uçucu kül içermeyen karışımların E_c -yük tekrar sayısı ilişkisi



Şekil 4.44. Filler olarak %2 oranında uçucu kül içeren karışımların E_c -yük tekrar sayısı ilişkisi



Şekil 4.45. Filler olarak %4 oranında uçucu kül içeren karışımların E_c -yük tekrar sayısı ilişkisi



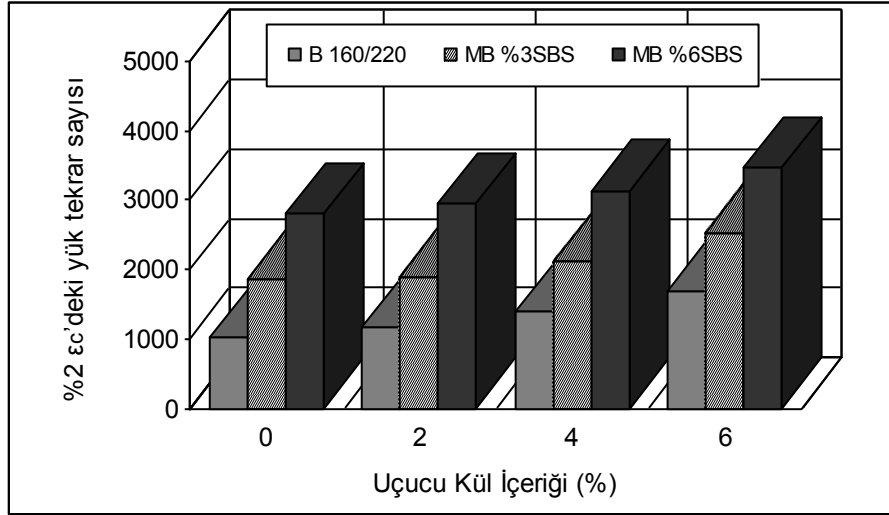
Şekil 4.46. Filler olarak %6 oranında uçucu kül içeren karışımların E_c -yük tekrar sayısı ilişkisi

Grafiklerde görülen değerler ardı ardına uygulanan yük tekrar sayılarındaki kalıcı birim şekil değiştirme değerlerinin (noktalarının) birleşmesi sonucu oluşmuştur. Karışımların kalıcı deformasyona karşı dayanımlarının daha net bir şekilde belirleyebilmek amacıyla %2 ve %3 kalıcı birim şekil değiştirme değerlerine neden olan yük tekrar sayıları, ayrıca 1000 ve 2000 yük tekrarındaki kalıcı birim şekil değiştirme değerleri karşılaştırılmıştır. Elde edilen değerler Tablo 4.23'de verilmiştir.

Tablo 4.23. Dinamik sünme deney sonuçları

SBS İçeriği (%)	Uçucu Kül İçeriği (%)	%2 ϵ_c 'deki yük tekrar sayısı	%3 ϵ_c 'deki yük tekrar sayısı	1000 yük tekrarındaki ϵ_c (%)	1000 yük tekrarındaki E_c (MPa)	2000 yük tekrarındaki ϵ_c (%)	2000 yük tekrarındaki E_c (MPa)
0	0	1020	1320	1.958	25.54	-	-
	2	1164	1596	1.737	28.79	-	-
	4	1398	1791	1.427	35.04	-	-
	6	1692	2232	1.285	38.79	2.491	20.15
3	0	1872	2364	1.170	42.74	2.192	22.81
	2	1890	2598	1.214	41.19	2.131	23.46
	4	2112	2856	1.121	44.60	1.891	26.44
	6	2526	3258	0.921	54.29	1.550	32.26
6	0	2802	3474	0.916	54.59	1.401	35.69
	2	2946	3738	0.868	57.60	1.355	36.90
	4	3138	4140	0.865	57.80	1.335	37.45
	6	3462	4356	0.791	63.21	1.178	42.48

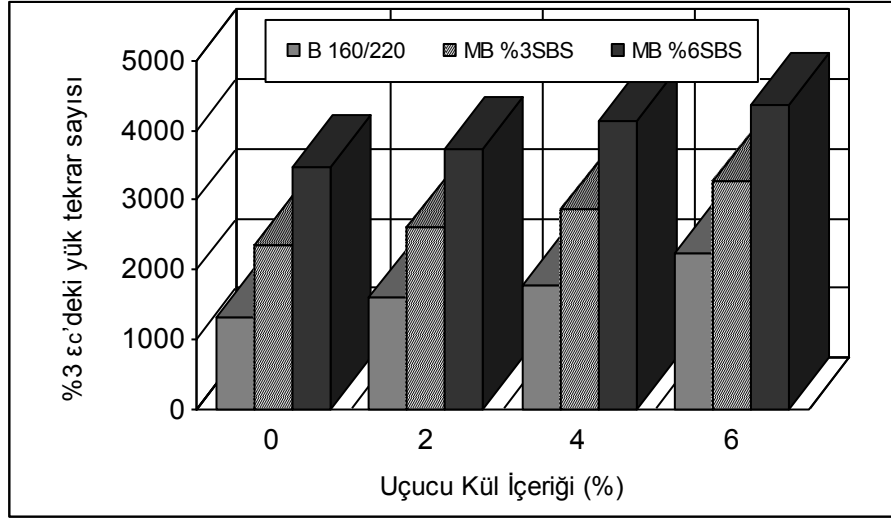
Elde edilen değerlerin uçucu kül ve SBS içeriği ile değişiminin daha net bir şekilde görülebilmesi için değişimler Şekil 4.47–52’de verilmiştir.

**Şekil 4.47.** Karışımların %2 ϵ_c değerindeki yük tekrar sayıları

Şekil 4.47’da görülen karışımların %2 ϵ_c değerindeki yük tekrar sayıları incelendiğinde hem SBS hem de uçucu kül kullanımı ile yük tekrar sayılarının arttığı belirlenmiştir. B 160/220 bitümü kullanılarak hazırlanan ve uçucu kül içermeyen karışımda

%2 oranında kalıcı birim şekil değiştirme oluşabilmesi için 1020 yük tekrarı gerekmiştir. B 160/220 bitümü ile hazırlanan karışımlarda %2 uçucu kül kullanılması durumunda %2 kalıcı birim şekil değiştirmeye neden olan yük tekrar sayısı %14.1, %4 oranında uçucu kül kullanılması durumunda %37.1, %6 oranında kullanılması durumunda ise %65.9 oranında artmıştır. MB_{3SBS} bitümü ile hazırlanan ve uçucu kül kullanılmayan karışımlarda %2 oranında kalıcı birim şekil değiştirme oluşabilmesi için 1872 yük tekrarı gerekmiştir. MB_{3SBS} bitümü ile hazırlanan karışımlarda %4 uçucu kül kullanılması durumunda %2 kalıcı birim şekil değiştirmeye neden olan yük tekrar sayısı aynı bağlayıcı ile hazırlanan ve uçucu kül içermeyen karışıma göre %12.8, %6 oranında kullanılması durumunda ise %34.9 oranında artmıştır. MB_{6SBS} bitümü ile hazırlanan ve uçucu kül kullanılmayan karışımlarda %2 oranında kalıcı birim şekil değiştirme oluşabilmesi için 2802 yük tekrarı gerekmiştir. MB_{6SBS} bitümü ile hazırlanan karışımlarda %4 uçucu kül kullanılması durumunda %2 kalıcı birim şekil değiştirmeye neden olan yük tekrar sayısı aynı bağlayıcı ile hazırlanan ve uçucu kül içermeyen karışıma göre %12.0, %6 oranında kullanılması durumunda ise %23.6 oranında artmıştır. Elde edilen sonuçlardan hem SBS hem de uçucu kül kullanımı ile %2 oranında kalıcı birim şekil değiştirmeye neden olan yük tekrar sayılarının arttığı belirlenmiştir. Ayrıca %2 oranında kalıcı birim şekil değiştirmeye neden olan yük tekrar sayıları üzerinde bağlayıcı modifikasyonunda kullanılan SBS içeriği arttıkça uçucun külün etkinliğinin azaldığı tespit edilmiştir.

Bitüm modifikasyonunda % 6 oranında SBS kullanılan ve uçucu kül içermeyen karışımın % 2 oranında kalıcı birim şekil değiştirmeye neden olan yük tekrar sayısı, saf karışıma göre (B 160/220 bitümü ile hazırlanan ve uçucu kül içermeyen) %174.7 artarken, B 160/220 bitümü ile hazırlanan ve %6 oranında uçucu kül içeren karışımda % 65.9 oranında artmıştır. Bitüm modifikasyonunda bitüm ağırlığının % 6'sı oranında SBS kullanılması ve filler olarak % 6 oranında uçucu kül kullanılması durumunda ise bu değer 3.4 kat artmıştır. Bu durum uçucu kül ve SBS'in birlikte kullanılmasının, % 2 oranında kalıcı birim şekil değiştirmeye neden olan yük tekrar sayılarındaki artış üzerinde katkıların ayrı ayrı kullanımına göre daha etkin olacağını göstermektedir.

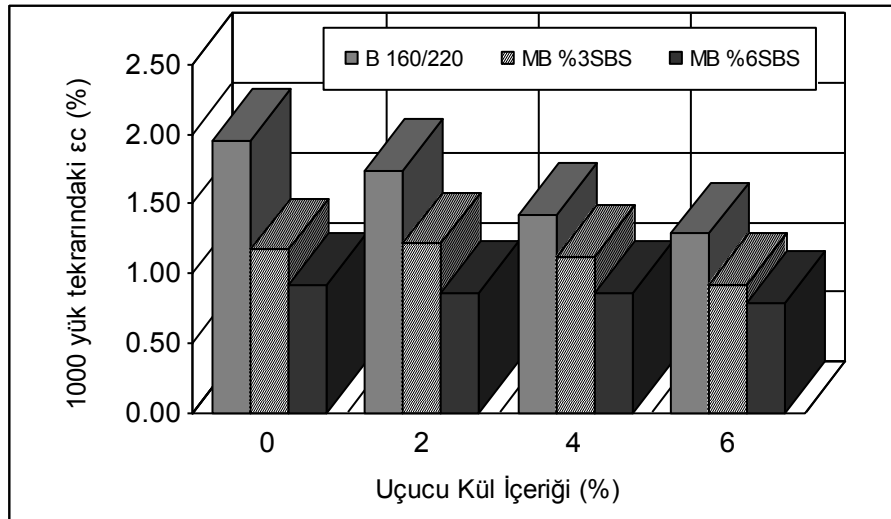


Şekil 4.48. Karışımların %3 ϵ_c değerindeki yük tekrar sayıları

Şekil 4.48’de görülen %3 oranında kalıcı birim şekil değiştirmeye neden olan yük tekrar sayıları incelendiğinde %2 oranında kalıcı birim şekil değiştirmeye neden olan yük tekrar sayılarında olduğu gibi katkı maddesi olarak hem SBS hem de uçucu kül kullanımı ile karışımların yük tekrar sayılarının arttığı belirlenmiştir. B 160/220 bitümü kullanılarak hazırlanan ve uçucu kül içermeyen karışımda %3 oranında kalıcı birim şekil değiştirmeye neden olan yük tekrar sayısının 1320 olduğu belirlenmiştir. Uçucu kül içermeyen karışımlarda B 160/220 bitümü ile hazırlanan karışıma göre MB%3SBS bitümü ile hazırlanan ve uçucu kül içermeyen karışımda %3 oranında kalıcı birim şekil değiştirmeye neden olan yük tekrar sayısının %79.1 oranında, MB%6SBS bitümü ile hazırlanan karışımda ise bu değer %163.2 oranında arttığı belirlenmiştir. %2 oranında uçucu kül içeren ve B 160/220 bitümü ile hazırlanan karışıma göre MB%3SBS bitümü ile hazırlanan ve %2 oranında uçucu kül içeren karışımda %3 oranında kalıcı birim şekil değiştirmeye neden olan yük tekrar sayısının %62.8 oranında, MB%6SBS bitümü ile hazırlanan karışımda ise bu değer %134.2 oranında arttığı belirlenmiştir. %4 oranında uçucu kül içeren ve B 160/220 bitümü ile hazırlanan karışıma göre MB%3SBS bitümü ile hazırlanan ve %4 oranında uçucu kül içeren karışımda %3 oranında kalıcı birim şekil değiştirmeye neden olan yük tekrar sayısının %59.5 oranında, MB%6SBS bitümü ile hazırlanan karışımda ise bu değer %131.2 oranında arttığı belirlenmiştir. %6 oranında uçucu kül içeren ve B 160/220 bitümü ile hazırlanan karışıma göre MB%3SBS bitümü ile hazırlanan ve %6 oranında uçucu kül içeren karışımda %3 oranında kalıcı birim şekil değiştirmeye neden olan yük tekrar sayısının %46.0 oranında, MB%6SBS bitümü ile hazırlanan karışımda ise bu değer %95.2 oranında arttığı

belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlardan SBS içeriği arttıkça %3 oranında kalıcı birim şekil değiştirmeye neden olan yük tekrar sayısı üzerinde uçucu külün etkisinin azaldığı belirlenmiştir.

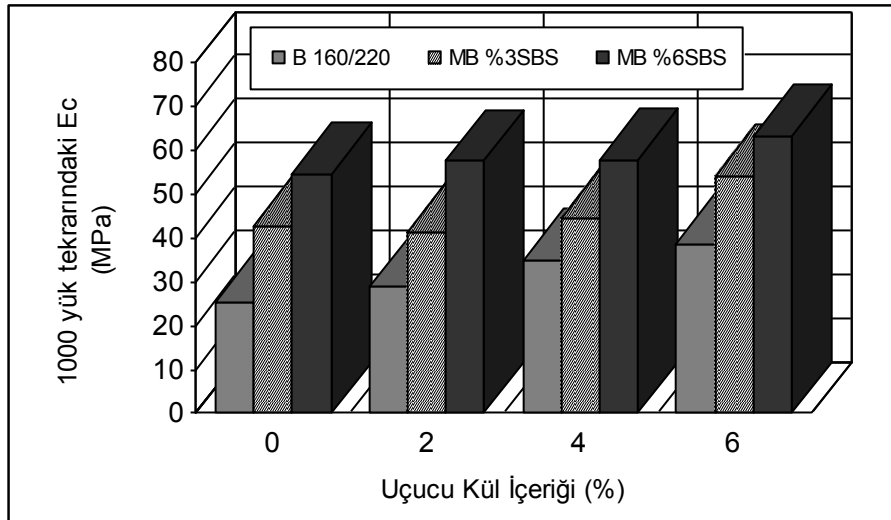
Bitüm modifikasyonunda %6 oranında SBS kullanılan ve uçucu kül içermeyen karışımın %3 oranında kalıcı birim şekil değiştirmeye neden olan yük tekrar sayısı, saf karışıma göre (B 160/220 bitümü ile hazırlanan ve uçucu kül içermeyen) % 163.2 artarken, B 160/220 bitümü ile hazırlanan ve %6 oranında uçucu kül içeren karışımda % 69.1 oranında artmıştır. Bitüm modifikasyonunda bitüm ağırlığının %6'sı oranında SBS kullanılması ve filler olarak % 6 oranında uçucu kül kullanılması durumunda ise bu değer 3.3 kat artmıştır. Bu durum uçucu kül ve SBS'in birlikte kullanılmasının, % 3 oranında kalıcı birim şekil değiştirmeye neden olan yük tekrar sayılarındaki artış üzerinde katkıların ayrı ayrı kullanımına göre daha etkin olacağını göstermektedir.



Şekil 4.49. Karışımların 1000 yük tekrar sayısındaki ϵ_c değerlerinin yük tekrar sayıları

Şekil 4.49'de görüldüğü üzere karışımların 1000 yük tekrarı sonundaki ϵ_c değerlerinin SBS ve uçucu kül kullanımı ile azaldığı belirlenmiştir. Karışımlar içerisinde 1000 yük tekrarı sonunda en fazla kalıcı birim şekil değiştirmenin B 160/220 bitümü ile hazırlanan ve uçucu kül içermeyen karışımda olduğu (1.958), en az kalıcı birim şekil değiştirmenin ise MB%6SBS bitümü ile hazırlanan ve %6 oranında uçucu kül içeren karışımda (0.791) olduğu belirlenmiştir. B 160/220 bitümü ile hazırlanan karışımlarda %2 uçucu kül kullanılması durumunda 1000 yük tekrarı sonundaki ϵ_c değerinin B 160/220 bitümü ile hazırlanan ve uçucu kül içermeyen karışıma göre % 11.3, %4 oranında uçucu

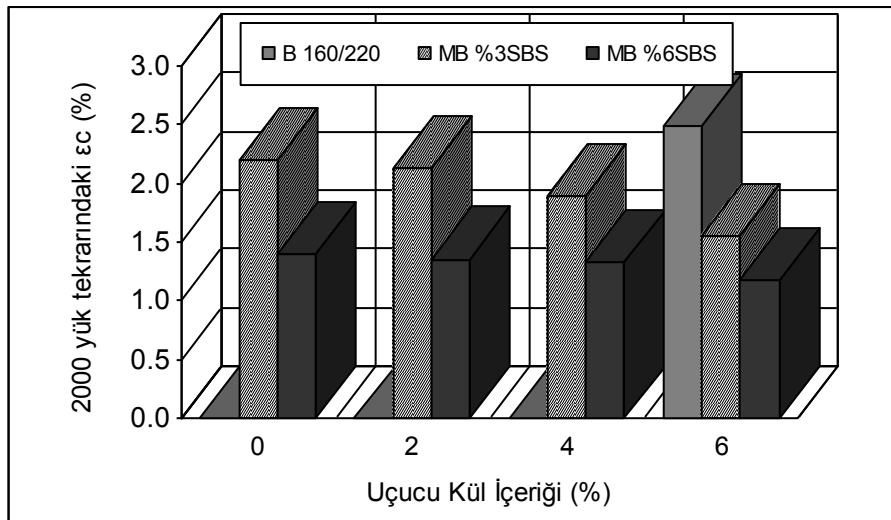
kül kullanılması durumunda % 27.1, % 6 oranında kullanılması durumunda ise % 34.4 oranında azalmıştır. MB%3SBS bitümü ile hazırlanan ve uçucu kül kullanılmayan karışımlarda 1000 yük tekrarı sonundaki ϵ_c değerlerinin 1.170 olduğu belirlenmiştir. MB%3SBS bitümü ile hazırlanan karışımlarda %4 uçucu kül kullanılması durumunda 1000 yük tekrarı sonundaki ϵ_c değerlerinin aynı bağlayıcı ile hazırlanan ve uçucu kül içermeyen karışıma göre %4.2, %6 oranında kullanılması durumunda ise % 21.3 oranında azalmıştır. MB%6SBS bitümü ile hazırlanan ve uçucu kül kullanılmayan karışımlarda 1000 yük tekrarı sonundaki ϵ_c değerlerinin 0.916 olduğu belirlenmiştir. MB%6SBS bitümü ile hazırlanan karışımlarda %4 uçucu kül kullanılması durumunda 1000 yük tekrarı sonundaki ϵ_c değerlerinin aynı bağlayıcı ile hazırlanan ve uçucu kül içermeyen karışıma göre % 5.6, % 6 oranında kullanılması durumunda ise %13.6 oranında azalmıştır. Elde edilen sonuçlardan hem SBS hem de uçucu kül kullanımı ile 1000 yük tekrarı sonundaki kalıcı birim şekil değiştirme değerlerinin azaldığı belirlenmiştir. Ayrıca 1000 yük tekrarı sonundaki kalıcı birim şekil değiştirme değerleri üzerinde bağlayıcı modifikasyonunda kullanılan SBS içeriği arttıkça uçucu külün etkinliğinin azaldığı tespit edilmiştir.



Şekil 4.50. Karışımların 1000 yük tekrar sayısındaki E_c değerlerinin yük tekrar sayıları

Şekil 4.50’da görüldüğü üzere karışımların 1000 yük tekrarı sonundaki E_c değerlerinin SBS ve uçucu kül kullanımı ile düzenli olarak arttığı belirlenmiştir. Karışımlar içerisinde 1000 yük tekrarı sonunda en düşük sünme modülünün B 160/220 bitümü ile hazırlanan ve uçucu kül içermeyen karışımda olduğu (25.54), en yüksek sünme modülünün ise MB%6SBS bitümü ile hazırlanan ve %6 oranında uçucu kül içeren karışımda

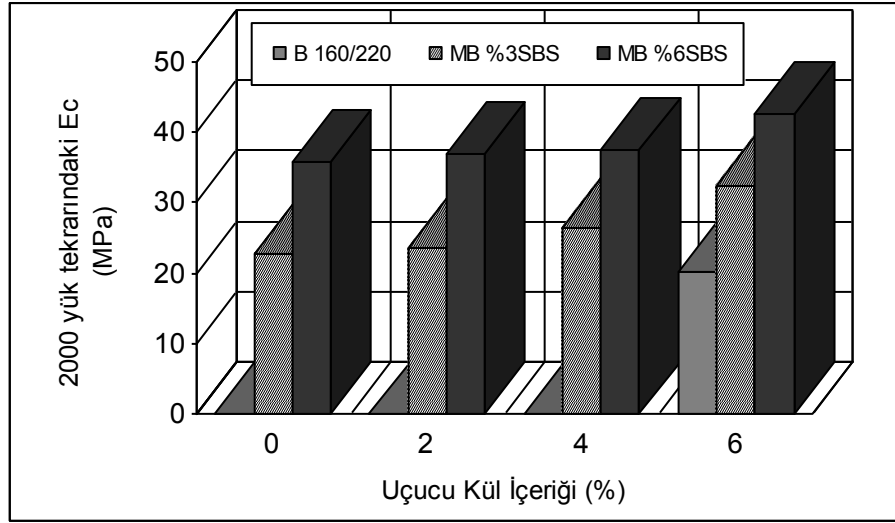
(63.21) olduğu belirlenmiştir. B 160/220 bitümü ile hazırlanan karışımlarda % 2 uçucu kül kullanılması durumunda 1000 yük tekrarı sonundaki E_c değerinin B 160/220 bitümü ile hazırlanan ve uçucu kül içermeyen karışıma göre %12.7, %4 oranında uçucu kül kullanılması durumunda % 37.2, % 6 oranında kullanılması durumunda ise % 51.9 oranında artmıştır. MB_{%3SBS} bitümü ile hazırlanan ve uçucu kül kullanılmayan karışımlarda 1000 yük tekrarı sonundaki E_c değerinin 42.74 MPa olduğu belirlenmiştir. MB_{%3SBS} bitümü ile hazırlanan karışımlarda % 4 uçucu kül kullanılması durumunda 1000 yük tekrarı sonundaki E_c değerinin aynı bağlayıcı ile hazırlanan ve uçucu kül içermeyen karışıma göre % 4.4, % 6 oranında kullanılması durumunda ise % 27.0 oranında artmıştır. MB_{%6SBS} bitümü ile hazırlanan ve uçucu kül kullanılmayan karışımlarda 1000 yük tekrarı sonundaki E_c değerinin 54.59 MPa olduğu belirlenmiştir. MB_{%6SBS} bitümü ile hazırlanan karışımlarda % 4 uçucu kül kullanılması durumunda 1000 yük tekrarı sonundaki E_c değerlerinin aynı bağlayıcı ile hazırlanan ve uçucu kül içermeyen karışıma göre % 5.9, % 6 oranında kullanılması durumunda ise % 15.8 oranında artmıştır. Elde edilen sonuçlardan hem SBS hem de uçucu kül kullanımı ile 1000 yük tekrarı sonundaki sünme modülü değerlerinin arttığı belirlenmiştir. Ayrıca 1000 yük tekrarı sonundaki sünme modülü değerleri üzerinde bağlayıcı modifikasyonunda kullanılan SBS içeriği arttıkça uçucu külün etkinliğinin azaldığı tespit edilmiştir.



Şekil 4.51. Karışımların 2000 yük tekrar sayısındaki ϵ_c değerlerinin yük tekrar sayıları

Şekil 4.51’de görülen 2000 yük tekrarı sonundaki ϵ_c değerleri incelendiğinde 1000 yük tekrarı sonundaki ϵ_c değerlerinde olduğu gibi katkı maddesi olarak hem SBS hem de

uçucu kül kullanımı ile karışımların ϵ_c değerlerinin azaldığı belirlenmiştir. B 160/220 bitümü kullanılarak hazırlanan ve uçucu kül içermeyen, % 2 ve % 4 oranında uçucu kül içeren karışımlar 2000 yük tekrarından önce bozulduğundan bu karışımların 2000 yük tekrarı sonundaki ϵ_c değerleri elde edilememiştir. B 160/220 saf bitümü ile hazırlanan ve % 6 oranında uçucu kül içeren karışımın 2000 yük tekrarı sonundaki ϵ_c değerinin % 2.491 olduğu belirlenmiştir. % 6 oranında uçucu kül içeren ve B 160/220 bitümü ile hazırlanan karışıma göre MB_{%3SBS} bitümü ile hazırlanan ve %6 oranında uçucu kül içeren karışımda 2000 yük tekrarı sonundaki ϵ_c değerinin % 37.8 oranında, MB_{%6SBS} bitümü ile hazırlanan karışımda ise bu değer % 52.7 oranında azaldığı belirlenmiştir.



Şekil 4.52. Karışımların 2000 yük tekrar sayısındaki E_c değerlerinin yük tekrar sayıları

Şekil 4.52’de görüldüğü üzere B 160/220 bitümü ile hazırlanan ve filler olarak % 0, % 2 ve % 4 oranlarında uçucu kül içeren karışımlar, 2000 yük tekrarından önce bozulduğundan 2000 yük tekrarından önceki E_c değerleri elde edilememiştir. Elde edilen değerler incelendiğinde hem SBS hem de uçucu kül kullanımı ile karışımların sünme modülü değerlerinin arttığı tespit edilmiştir. B 160/220 saf bitümü ile hazırlanan ve % 6 oranında uçucu kül içeren karışımın 2000 yük tekrarı sonundaki E_c değerinin 20.15 MPa olduğu belirlenmiştir. % 6 oranında uçucu kül içeren ve B 160/220 bitümü ile hazırlanan karışıma göre MB_{%3SBS} bitümü ile hazırlanan ve % 6 oranında uçucu kül içeren karışımda 2000 yük tekrarı sonundaki E_c değerinin % 60.1 oranında, MB_{%6SBS} bitümü ile hazırlanan karışımda ise bu değer %110.8 oranında arttığı belirlenmiştir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Tez çalışmasında, bitüm modifikasyonunda kullanılan stiren-butadien-stiren (SBS) ve karışım modifikasyonunda uçucu kül kullanımının bitümlü sıcak karışımların mekanik özellikleri üzerindeki etkileri geniş bir aralıkta incelenmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda SBS oranının %3-6 aralığında olması gerektiği belirtilmiştir. Bu nedenle çalışmada, üst sınır (%6) ve bu değerin yarısı (%3) SBS içeriği olarak belirlenmiştir. Çalışmada kullanılan filler oranı %6 olduğundan uçucu kül, eşit aralıklı olacak şekilde üç farklı oranda (%2, %4 ve %6) kullanılmıştır. Çalışmada toplam 12 adet karışım türü değerlendirilmiştir. Bu karışımların optimum bitüm içerikleri Marshall yöntemine göre belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlardan karışımlardaki uçucu kül miktarı arttıkça optimum bitüm içeriğinin azaldığı, SBS içeriği arttıkça ise optimum bitüm içeriğinin arttığı belirlenmiştir.

Stabilite ve akma deneyleri sonucunda hem SBS kullanımı hem de uçucu kül kullanımı ile karışımların stabilite değerlerinin arttığı belirlenmiştir. Karışımlar içerisinde en düşük Stabilite değerine B 160/220 saf bitümü ile hazırlanan ve filler olarak tamamen kalker kullanılan karışımların sahip olduğu, en yüksek Stabilite değerine ise MB%6SBS bitümü ile hazırlanan ve filler olarak %6 oranında uçucu kül içeren karışımın sahip olduğu belirlenmiştir. Ayrıca SBS ile bitüm modifikasyonunun uçucu kül ile karışım modifikasyonuna göre stabilite değerleri açısından daha etkin olduğu belirlenmiştir. SBS ve uçucu kül kullanımı ile akma değerlerinde düzenli bir değişme meydana gelmemiş, değerlerin genel olarak birbirine yakın olduğu tespit edilmiştir. Marshall oranı (MQ) değerlerinden SBS ve uçucu kül kullanımı ile MQ değerlerinin genel olarak arttığı belirlenmiştir.

İndirekt çekme rijitlik modülü deneyleri sonucunda bitüm modifikasyonunda SBS ve karışım modifikasyonunda uçucu kül kullanımı ile karışımların indirekt çekme rijitlik modülü değerlerinin arttığı belirlenmiştir. Ayrıca SBS modifikasyonunun uçucu kül modifikasyonuna göre daha etkin olduğu tespit edilmiştir. Bütün karışımlar incelendiğinde MB%6SBS bitümü ve filler olarak %6 uçucu kül içeren karışımın en yüksek ITSM değerine sahip olduğu belirlenmiştir. ITSM deney sonuçlarından hem SBS hem de uçucu kül kullanımı ile normal sıcaklıklarda karışımların rijitliğinin artacağı, bu iki katkı

maddesinin birlikte kullanımı ile de karışımların rijitlikleri üzerindeki etkilerinin daha da artacağı söylenebilir.

Nem hasarına karşı dayanımın göstergesi olan çekme dayanımı oranı (TSR) deneyleri sonucunda hem SBS hem de uçucu kül kullanımı ile koşullandırmadan önce ve sonra çekme dayanımı değerlerinin arttığı belirlenmiştir. Ayrıca saf bağlayıcı ile hazırlanan karışımlarda uçucu külün TS değerleri üzerinde daha etkin olduğunu, bağlayıcı modifikasyonundaki SBS oranı arttıkça uçucu külün etkisinin azaldığı belirlenmiştir. SBS ve uçucu külün etkisi değerlendirildiğinde diğer deney sonuçlarında olduğu gibi SBS'in daha etkin olduğu belirlenmiştir. SBS içermeyen ve filler olarak %6 oranında uçucu kül içeren karışımın çekme dayanım değerlerinin hem koşullandırma işleminden önce hem de sonraki çekme dayanım değerlerinin MB%3SBS bitümü ile hazırlanan ve uçucu kül içermeyen karışımlarla benzer olduğu belirlenmiştir. Çekme dayanımı değerlerinde olduğu gibi hem SBS hem uçucu kül içeriği arttıkça karışımların TSR değerlerinin arttığı belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlardan hem SBS kullanımının hem de uçucu kül kullanımının bitümlü sıcak karışımların nem hasarına karşı dayanımını arttırdığı belirlenmiştir. Uçucu kül ve SBS'in birlikte kullanımı ile nem hasarına karşı dayanımın daha fazla oranda arttığı tespit edilmiştir.

İndirekt çekme yorulma deneyleri sonucunda diğer deneylerde olduğu gibi hem SBS hem de uçucu kül kullanımı ile karışımların yorulma ömürlerinin arttığı belirlenmiştir. SBS kullanımının uçucu kül kullanımına göre yorulma değerleri üzerinde daha etkin olduğu, karışımlardaki SBS içeriği arttıkça uçucu külün etkinliğinin azaldığı tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlardan hem SBS'in hem de uçucu külün yorulma deneyinde meydana gelen deformasyon miktarlarını azalttığı, SBS ve uçucu külün birlikte kullanımı ile deformasyon miktarlarında daha fazla azalma meydana geldiği tespit edilmiştir.

Dinamik sünme deneyleri sonucunda ise hem SBS'in hem de uçucu külün bitümlü sıcak karışımların kalıcı deformasyona karşı dayanımlarını arttırdığı belirlenmiştir. Ayrıca diğer deneylerde olduğu gibi karışımlarda katkı malzemesi olarak kullanılan SBS içeriği arttıkça uçucu külün etkinliğinin azaldığı, SBS'in uçucu küle göre kalıcı deformasyona karşı dayanım bakımından daha etkin bir katkı maddesi olduğu tespit edilmiştir.

Bütün deneyler göz önünde bulundurulduğunda, hem SBS hem de uçucu kül kullanımı ile karışımların normal sıcaklıklardaki rijitliklerinin, stabilitelerinin, nem hasarına karşı dayanımlarının, yorulma ömürlerinin ve kalıcı deformasyona karşı dayanımlarının arttığı belirlenmiştir. Deneyler sonucunda bu katkıların birlikte kullanımı

ile olumlu etkilerinin artacağı tespit edilmiştir. Katkılar ayrı ayrı değerlendirildiğinde ise SBS'in uçucu küle göre daha etkin olduğu belirlenmiştir. Ayrıca karışımdaki SBS içeriği arttıkça uçucu külün etkinliğinin azaldığı tespit edilmiştir.

Bu çalışmada bitüm modifikasyonunda SBS ve karışım modifikasyonda uçucu kül kullanılarak elde edilen 12 farklı bitümlü sıcak karışımın meknik özellikleri incelenerek olumlu sonuçlar elde edilmesine karşılık, katkı maddelerinin maliyeti incelenmemiştir. Bundan sonra yapılacak çalışmalarda karışımların mekanik özelliklerini geliştirmek için kullanılan katkı maddelerinin bitümlü sıcak karışımların birim maliyetlerine etkileri ve modifikasyonun ekonomik boyutu da araştırılmalıdır.

KAYNAKLAR

- [1] **AASHTO**, 1994. A Policy on Geometric Design of Highways and Streets, Washington D.C
- [2] **AASHTO T283**, 2003. Standard Method of Test for Resistance of Compacted Hot Mix Asphalt (HMA) to Moisture-Induced Damage, *American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO)*, Washington DC.
- [3] **Adedeji A., Grunfelder T., Bates FS., Macosko CW.**, 1996. Stroup-Gardiner M, Newcomb DE. “Asphalt Modified by SBS Triblock Copolymer: Structures and Properties”, *Polym Eng Sci*.
- [4] **Ağar, E., Umar, F.**, 1985. Yol Üstyapısı, 3. Baskı İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul.
- [5] **Aglan, H., Othman, A., Figueroa, L. and Rollings, R.**, 1993. Effect of Styrene-Butadiene-Styrene Block Copolymer on Fatigue Crack Propagation Behavior of Asphalt Concrete Mixtures, *Transportation Research Record*, 1417, 178-186.
- [6] **Ahmedzade, P., Yılmaz, M., ve Yılmaz, M.**, 2007. Epoksi Reçine ile Modifiye Edilen Bitümlerin Fiziksel Özellikleri Üzerinde Yaşlanmanın Etkisi, *Fırat Üniversitesi Fen ve Mühendislik. Bilimleri*, 19, 147-154.
- [7] **Aksoy, A., Şamlıoğlu, K., Tayfur, S. ve Özen, H.**, 2005. Effects of Various Additives on the Moisture Damage Sensitivity of Asphalt Mixtures, *Construction and Building Materials*, 19 (1), 11-18.
- [8] **Alataş, T.**, 1996.“ Afşin – Elbistan Termik Santralı Uçucu Külünün Yol Stabilizasyonunda Çeşitli Malzemelerle Birlikte Kullanımı”, *Doktora Tezi*, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [9] **Ali, N., Chan J.S., Simms, S., Bushman, R., and Bergan, A.T.**, 1996. “Mechanistic Evaluation of Fly Ash Asphalt Concrete Mixtures”, *J. Mater. Civ. Eng.*, 8(1), 19-25.
- [10] **Al-Khateeb, G. G., Al – Akhras, N.M.**, 2011. Properties of Portland Cement-Modified Asphalt Binder Using Superpave Tests, *Construction and Building Materials*, 25, 926-932.

- [11] **Ameri, M., Mansourian, A., Ashani, S.S., Yadollahi, G.,** 2010. Technical Study on The Iranian Gilsonite As An Additive for Modification of Asphalt Binders Used in Pavement Construction, *Construction and Building Materials*, 25, 1379-1387.
- [12] **Apeagyei, A.K.,** 2010. Laboratory Evaluation of Antioxidants for Asphalt Binders, *Construction and Building Materials*, 25, 47-53.
- [13] **Asfalt El Kitabı,** 2002. İstanbul Büyükşehir Belediyesi, İSFALT Bilimsel Yayın No:2, İstanbul, 573s.
- [14] **Asfalt ve Uygulamaları,** 2001. İstanbul Büyükşehir Belediyesi, İSFALT Bilimsel Yayın No:1, İstanbul, 280s.
- [15] **Asphalt Institute,** 1996. Mix Design Methods for Asphalt Concrete and Other Hot Mix Types, Asphalt Institute, Manual Series No.2 (MS-2) Kentucky.
- [16] **Asi, I., Assaad, A.,** 2005. "Effect of Jordanian Oil Shale Fly Ash on Asphalt Mixes", *J.Mater. Civ. Eng.*, 17(5).
- [17] **ASTM D 1559-89.** 1992. Standard Test Method for Resistance to Plastic Flow of Bituminous Mixtures Using Marshall Apparatus. Annual Book of ASTM Standards. USA.
- [18] **Balta, İ.,** 2004. Bitümlü Sıcak Karışımların Sudan Kaynaklanan Bozulmalara Karşı Duyarlılığı, *Yüksek Lisans Tezi*, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 224s.
- [19] **Beysher, R.V.,** 1989. Talloviy Pek Aftoreferat, Moscow, 1-19 s
- [20] **Birliker, R. Y.,** 1998. "Bitümlü Karışımlara Eklenebilecek Katkılar ile Bu Tip Bitümlü Karışımların Davranışlarının Araştırılması ve Bir Yorulma Eğrisi Tahmin Modeli", *Doktora Tezi*, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [21] **BS DD 213,** 1993. Method for Determination of the Indirect Tensile Stiffness Modulus of Bituminous Mixtures, *British Standards Institution*, London.
- [22] **Cabrera, J.G., and Zoorob, S.,** 1994. "Design of Low Energy Hot Rolled Asphalt" , In Proceedings of the 1 st European Symposium, The Civil Engineering Materials Unit, Department of Civil Engineering, University of Leeds, UK. pp 289-308.
- [23] **Cabrera, J.G., and Zoorob, S.E.,** 1995. "Design of low energy hot rolled asphalt" , The Civil Engineering Materials Unit, Dept of Civil Engineering, University of Leeds, UK.

- [24] **Çalışıcı, M.**, 2009. Bitümün Sentetik Metal ve Polimer Katkı Maddeleriyle Yaşlanma Direncinin Arttırılması, *Doktora Tezi*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [25] **Cao, W.**, 2007, Study on Properties of Recycled Tire Rubber Modified Asphalt Mixtures Using Dry Process, *Construction and Building Materials*, 21, 1011–1015.
- [26] **Carpenter, C.A.**, 1952. “A Comparative Study of Fillers In Asphaltic Concrete”, *Public Roads*, 27: 101-110.
- [27] **Çubuk, K. M.**, 1998, “Katkı Maddesi Olarak Diatomit’in, Bitümlü Sıcak Karışımların Davranışı Üzerine Etkileri”, *Doktora Tezi*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Ens., Ankara, 2-4.
- [28] **Çubuk, K. M.**, 2001, “Karayolları Üstyapısında Meydana Gelen Bozunmalar ve Çözüm Önerileri”, *G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 14 (1): 221-230.
- [29] **Çubuk, M.**, 2007. “Katkı Maddeleri ile Bitümün. Reolojik Özelliklerinin Geliştirilmesi ve Esnek Kaplama Malzeme Oluşumunda Problemlerin Giderilmesi”, *Doktora Tezi*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Ens., Ankara.
- [30] **Çubuk, M., Gürü, M., ve Çubuk, M.K.**, 2009. Improvement of Bitumen Performance With Epoxy Resin, 88, 1324-1328.
- [31] **Deniz, M.T., Sönmez, İ., Yıldırım S.A., Eren B.K.**, 2011. Kullanılmış Otomobil Lastiklerinin Bitümlü Sıcak Karışım Performansına Etkisi, <http://www.e-kutuphane.imo.org.tr/pdf/3208.pdf>.
- [32] **Doğan, O.**, 2006, Esnek Üstyapılı Devlet Yollarındaki Bozulmaların Bulanık Mantık İle Tahmini, *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [33] **Edwards, Y., Tasdemir, Y., Isacsson, U.**, 2007. Rheological Effects of Commercial Waxes and Polyphosphoric Acid in Bitumen 160/220 – High and Medium Temperature Performance, *Construction and Building Materials*, 21, 1899-1908.
- [34] **ELE**, 1994. Universal Materials Testing Apparatus for Asphalt and Unbound Specimens, Reference and Operating Manual, ELE International Ltd., Hertfordshire, UK.
- [35] **El- Hadidy, A. I., Tan Y.– Q.**, 2009. Mechanistic Approach for Polypropylene-Modified Flexible Pavements, *Materials and Design*, 30, 1133-1140.

- [36] **Eren, Ü.**, 2008. Asfaltitin Asfalt Betonunda Mineral Filler Olarak Kullanılması, *Yüksek Lisans Tezi*, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- [37] **Ertekin, S. B.**, 2003. Polyolefin Katkıların Asfaltların Kıvamı ve Yumuşama Noktasına Etkileri, *Yüksek Lisans Tezi*, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- [38] **Francken, L.**, 1998. Bituminous Binders and Mixes, Rilem Reports, 352p.
- [39] **Garcia-Morales, M., Partal, P., Navarro, F.J., Martinez-Boza, F., Gallegos, C., Gonzalez N., Gonzalez O., Munoz M.E.**, 2003. Viscous Properties and Microstructure of Recycled Eva Modified Bitumen, *Fuel*, 83, 31-38.
- [40] **Geçkil, T.**, 2008. “Siyah Karbonun Bitümlü Sıcak Karışımların Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi”, *Doktora Tezi*, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [41] **Güzel, G.**, 2001. Seminer Çalışması, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [42] **Haddadi, S., Ghorbel, E., ve Laradi, N.**, 2008. Effects of The Manufacturing Process on The Performances of The Bituminous Binders Modified With EVA, *Construction and Building Materials*, 22, 1212-1219.
- [43] **Harman, T., D’Angelo, J., Bukowski, J.**, 2002. Superpave Asphalt Mixture Design Workshop, U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration, Washington, 78p.
- [44] **Henning, N. E.**, 1974. “Evaluation Of Lignite Fly Ash As A Mineral Filler In Asphaltic Concrete”, Twin City Testing and Engineering Laboratory, St. Paul, Minn. Report No.2(73).
- [45] **Hınışoğlu, S., Ağar, E.**, 2004. Use of Waste High Density Polyethylene As Bitumen Modifier İn Asphalt Concrete Mix, *Materials Letters*, 58, 267-271.
- [46] **İlcalı, M.**, 1988. “Karayolu Üstyapısında Erdemir Cürufunun Kullanılabilirliğinin Araştırılması”. Y.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, *Doktora Tezi*, 152s, İstanbul.
- [47] **İlcalı, M.**, 2001. Asfalt Kaplamalar, İstanbul Asfalt Sanayi ve Ticaret A.Ş. Yayınları, Yayın No.1, İstanbul.
- [48] **İlcalı, M.**, 2001. Asfalt ve Uygulamaları, İSFALT Bilimsel Yayınları, No: 1, 280 s., İstanbul.
- [49] **İlcalı, M., Tayfur. S., Özen, H., Sönmez, İ., Eren, K.**, 2001. Asfalt ve Uygulamaları, Yıldız Teknik Üniversitesi Yayınları, 1-3, İstanbul.

- [50] **İlcalı, M., Tayfur, S., Özen, H., Sönmez, İ., Eren, K.,** 2001,“Asfalt ve Uygulamaları”, İstanbul Büyükşehir Belediyesi İstanbul Asfalt Fabrikaları Sanayi ve Ticaret A.Ş., İstanbul, 37-46, 91-97.
- [51] **Isacsson, U., Lu, X.,** 1995. Testing and Appraisal of Polymer Modified Road Bitumens, State of the Art, Materials and Structures, 28, 139-159.
- [52] **Isacsson, U., Lu, X.,** 1999. Characterization of Bitumens Modified with SEBS, EVA and EBA Polymers, Journal of Materials Science, 34, 3737-3745.
- [53] **Ishai, I., Kallas, B.F.,** 1973. Effect of The Filler on Agreggate-Bitumen Adhesion Propertios in Bituminous Mixtures, Proc., AAPT.
- [54] **Işıkyakar, G.,** 2009. Polimer Modifiye Asfaltların Reolojik ve Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesinde Fluoresan Mikroskopi Yönteminin Kullanımı, *Yüksek Lisans Tezi*, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- [55] **Jones, R.,** 1990. Modifiers for Asphalt Concrete, Air Force Engineering and Service Center Project, No: ESL–TR–88-32, p. 93.
- [56] **Kaloush KE., Witczak MW.,** 2002. Tertiary Flow Characteristics of Asphalt Mixtures. J. Assoc Asphalt Paving Technol 71:278–306.
- [57] **Karacasu, M., Bilgiç, Ş.,** 2009. Atık Lastik Katkısının Sıcak Asfalt Özelliklerine Etkisi, *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 22, 45-63.
- [58] **Karacasu, M., Çakar B.,** 2009. Atık Tuğla Kırıklarının Asfalt Betonu Özelliklerine Etkisi, *İzmir Ulaşım Sempozyumu*, İzmir.
- [59] **Karasahin M, Terzi S.,** 2007. Evaluation of Marble Waste Dust in the Mixture of Asphalt Concrete, Construction and Building Materials, 21(3), 616–620.
- [60] **Kaşak, S.,** 2007, “Taş Mastik Asfalt Karışımında Katkı Maddesi Olarak Fiber Yerine Diatomit’in Uygulanabilirliğinin Araştırılması”, *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [61] **Kaşak, S., Orhan, F., Eribol, S., Güngör, A. G.,** 2004. “Yeni Bitüm Standardı”, 4. Ulusal Asfalt Sempozyumu, Ankara, 405-413.
- [62] **Kavussi, A., and Hicks, R.C.,** 1977. “Properties Of Bituminous Mixtures Containing Different Fillers”, Proc, Assoc. Asphalt Paving Technologists, 66, 153-185.

- [63] **Keçeciler, A. F., Gümrükçüoğlu, A., Akkol, G., Gökçe, A. F.,** 1988. Bitümlü Malzemeler Laboratuvar El Kitabı, Karayolları Genel Müdürlüğü Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı, Ankara.
- [64] **Kırbaş, H.,** 1999. “Asfalt Kaplamalarda Bozulma Sebepleri ve Oluşan Yüzeysel Soyulmalar ile Çatlakların Modern Malzemelerle Onarım Yöntemleri”, Dumlupınar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları, Kütahya.
- [65] **Kök, V. B., Yılmaz, M.,** 2008. “Stiren-Butadien-Stiren Modifiyeli Bitümlü Bağlayıcıların Superpave Sistemine Göre Yüksek Sıcaklık Performans Seviyesinin ve İşlenebilirliğinin Belirlenmesi” *Makale*, Fırat üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği, Elazığ.
- [66] **Kök, B. V., Yılmaz, M.,** 2009. The Effects of Using Lime and Styrene-Butadiene-Styrene on Moisture Sensitivity Resistance of Hot Mix Asphalt, *Construction and Building Materials*, 23, 1999-2006.
- [67] **Kök, B. V., Yılmaz, M., Kuloğlu, N. ve Turgut, P.,** 2010. Laboratory Investigation of Syrian Natural Asphalt in Asphalt Concrete, 9th International Congress on Advances in Civil Engineering, Trabzon, Turkey, September 27-30, 1-6.
- [68] **Kuleli, Ö.,** 1981. “Yağlama Yağı, Vaks ve Asfalt”, “Petrol Arıtım Teknolojisi”, Çağlayan Kitapevi, İstanbul, 201-202.
- [69] **Kuloğlu, N.,** 2001. Bitüm ve Bitümlü Sıcak Karışımların Rijitliğine Etki Eden Parametreler, *TÜBİTAK, Türk Mühendislik ve Çevre Bilimleri Dergisi*, 25, 61-67.
- [70] **Kumar, P., Mehndiratta, H.C., and Singh, V.,** 2008. “Use of Fly Ash In Bituminous Layer of Pavement”, *Indian Highways*, New Delhi, India, 41-50.
- [71] **Kurtis, K.,** 2003. Asphalt and Asphalt Concrete, Scholl of Civil Engineering Georgia Institute Technology, Atlanta, Georgia.
- [72] **Lu X, Isacsson U.,** 2001. “Modification of Road Bitumens With Thermoplastic Polymers”, *Polym Test*.
- [73] **Macit, S.,** 2003. “Reverber Fırın Cürufunun Sıcak Karışım Asfalt Betonunda Kullanımı”, *Yüksek Lisans Tezi*, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- [74] **Malkoç, G., Önal, M.A.,** 1998. Modifiye Bitümlü Bağlayıcılar, Özel Bitümler ve Katkılı Bitümlerin Yol Uygulamalarındaki Kullanımları, 2. Ulusal Asfalt Sempozyumu, 30-45.

- [75] **Mei-zhu, C., Jun-tao, L., Shao-peng, W., Cong-hui, L.**, 2010. "Utilization Of Recycled Brick Powder As Alternative Filler İn Asphalt Mixture", *Construction and Building Materials*, 25, 1532-1536.
- [76] **Namlı, R.**, 2004. "Yol Üstyapısı Esnek Kaplamaların Superpave ve Marshall Metodları İle Analizi ve Karşılaştırılması", *Doktora Tezi*, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [77] **Nejad FM, Aflaki E, Mohammadi MA.**, 2010. Fatigue Behavior of SMA and HMA Mixtures. *Constr Build Mater*, 24:1158-65.
- [78] **Nicholls, C.**, 1998, *Asphalt Surfacing*, E & FN Spon, pp. 68–79.
- [79] **Önal, M. A., Kahramangil M.**, 1993. Bitümlü Karışımlar Laboratuvar El Kitabı, Karayolları Genel Müdürlüğü Matbaası, Ankara, 200s.
- [80] **Rosner, J. C. Chehovits, J.G and Morris, G.R.**, 1982. "Fly Ash As Mineral Filler And Anti-Strip Agent for Asphalt Concrete", in *Proceedings of the 6th International Ash Utilization Symposium*, Vol.1, United States Department of Energy, Morgantown, W.Va. Report No: DOE/METC/82/2.
- [81] **Saltan, M.**, 1999. "Esnek Üstyapıların Analitik Değerlendirilmesi", *Doktora Tezi*, SDÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, s.202, Isparta.
- [82] **Sağlık, A., Güngör, G. A.**, 2006. "Karayolları Esnek Üstyapılar Projelendirme Rehberi", T.C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Karayolları Genel Müdürlüğü Teknik Araştırma Dairesi Başk. Üstyapı Şubesi Müdürlüğü Yayını, Ankara.
- [83] **Sankaran, K.S., and Rao. D.R.**, 1973. "The Influence of The Quality of Filler in Asphaltic Paving Mixtures". *Indian Roads Congress*, 35:141-151.
- [84] **Sayın, E., Tanyıldızı, H.**, 2006. "Bitümlü Sıcak Karışımların Rijitliğinin Bulanık Mantık ile Bulunması" *Makale*, Fırat üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği, Elazığ.
- [85] **Sharma, V., Chandra, S, and Choudhary, R.**, 2010. "Characterization of Fly Ash Bituminous Concrete Mixes" *Journal of Material in Civil Engineering*, Vol:22, No:12, ASCE.
- [86] **Shell Bitüm El Kitabı**, 2004. İstanbul Büyükşehir Belediyesi, İSFALT Bilimsel Yayın No:3, İstanbul, 334s.

- [87] **Sönmez, İ., Deniz, M.T., Tayfur, S., Özen, H., Yıldırım, S.A. ve Eren, B.K. ,** 2005. Modifiye Katkı Maddelerinin Bitümlü Sıcak Karışıma Etkisi ve Performans Üstünlükleri, 6. Ulaştırma Kongresi, İstanbul, 23-25 Mayıs, 334-348.
- [88] **Suheibani, A.R.S.,** 1986. “The Use of Fly Ash An Asphalt Extender”, Ph.D. Thesis, University of Michigan, Ann Arbor, Mich.
- [89] **Swaminathan, C.G.,** Nair, K. 1968. “Fly Ash As A Filler In Bituminous Mixes”, Road Research Paper 69, CRRI, New Delhi, India, 16-24.
- [90] **Sybilski, D.,** 1994. “Relationship Between Absolute Viscosity of Polymer Modified Bitumens And Rutting Resistance of Pavement”, Material and Structures, 27, 110-120.
- [91] **Şengöz, B., Ağar, E.,** 2005. “Asfalt Film Kalınlığının Bitümlü Karışımların Yaşlanmasına Etkisi”, İTÜ Dergisi, 4 (1), 71-82.
- [92] **Şengül, C.E.,** 2006. “Asfalt Kaplamalarda Tekerlek İzinde Oturma ve Su Hasarı Problemlerinin Azaltılması İçin Sönmüş Kireç Kullanımı”, *Yüksek Lisans Tezi*, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- [93] **Tapkın, S.,** 2008. “Mechanical Evaluation of Asphalt-Aggregate Mixtures Prepared With Fly Ash As A Filler Replacement”, Canadian Journal Civil. Eng., 35, 27-40, NRC, Canada.
- [94] **Tapkın, S.,** 2009. Bitümlü Karışımların Uçucu Külün Filler Olarak Kullanımı Sonucu Mekanik Özelliklerindeki Değişimlerin İncelenmesi, *İzmir Ulaşım Sempozyumu*, İzmir, Aralık 8-9.
- [95] **Taşçı, A.,** 2010. “Piroliz Edilmiş Atık Araç Lastiklerinden Elde Edilen Atık Yağ ve Karbon Siyahı ile Modifiye Edilmiş Bitümlü Bağlayıcının Reolojik Özellikleri”, *Yüksek Lisans Tezi*, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- [96] **Tayfur, S., Özen, H., Aksoy, A.,** 2007. Investigation of Rutting Performance of Asphalt Mixtures Containing Polymer Modifiers, Construction and Building Materials, 21, 328-337.
- [97] **T.C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı,** 2007-2011. Karayolları Genel Müdürlüğü, 2007, Stratejik Plan, Ankara.

- [98] **Terzi, S.**, 2000. “Mermer Toz Atıkların Asfalt Betonunda Filler Malzemesi Olarak Kullanılmasının Araştırılması”, *Yüksek Lisans Tezi*, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- [99] **The Asphalt Institute**, 1996. Superpave Mix Design, Superpave Series No. 2 (SP-2), U.S.A., 100p.
- [100] **Tıgdemir, M., Kalyoncuoğlu, Ş.F.**, 2005. SBS-ELastomer Katkılı Asfalt Betonu Karışımlarında Plastik Deformasyon Davranışı, *Antalya Yöresinin İnşaat Mühensiliği Sorunları Kongresi*, Antalya. Eylül 22-24.
- [101] **Tons, E., Goetz, R.O, and Razi, M.**, 1983. “Fly Ash as Asphalt Reducer in Bituminous Base Courses”, Project Report, Universty of Michingan, the Board of Water and Light, Consumer Power Co., and Edison Co., Detroit, Mich.
- [102] **TS 118, EN 1426**, 2002. Bitümler ve Bitümlü Bağlayıcılar – İğne Batma Derinliği Tayini, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara. 12 s.
- [103] **TS 120, EN 1427**, 2002. Bitümler ve Bitümlü Bağlayıcılar-Yumuşama Noktası Tayini-Halka ve Bilya Metodu, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara. 12 s.
- [104] **TS 706**, 1980. Beton Agregaları, TSE, Ankara, 1-2 s.
- [105] **TS 3526**, 1980. Beton Agregalarında Özgül Ağırlık ve Su Emme Oranı Tayini, *Türk Standartları Enstitüsü.*, 2-8
- [106] **TS 3655**, 1981. Beton Agregalarında Dona Dayanıklılık Tayini, *Türk Standartları Enstitüsü.*, 2-8 s.
- [107] **TS 3694**, 1981. Beton Agregalarında Aşınmaya Dayanıklılık Aşınma Oranı Tayini Metodu, *Türk Standartları Enstitüsü.*, 1-5 s.
- [108] **TS EN 12607-1**, 2003. Bitümler ve Bitümlü Bağlayıcılar – Sıcaklık ve Havanın Etkisiyle Sertleşmeye Karşı Direncin Tayini – Bölüm 1: RTFOT (Etüvde Hareket Halinde İnce Film Deneyi) Yöntemi, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [109] **TS EN 12697-24+A1**, 2004. Bitümlü Karışımlar - Sıcak Asfalt Karışımları İçin Deney Yöntemleri - Bölüm 24: Yorulma Direnci, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara
- [110] **TS EN 12697-34**, 2007. Bitümlü Karışımlar-Sıcak Asfalt Karışımları İçin Deney Yöntemleri - Bölüm 34: Marshall deneyi, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.

- [111] **Tunç, A.**, 2001. Yol Malzemeleri ve Uygulamaları, Atlas Yayınevi, İstanbul, 840s.
- [112] **Tunç, A.**, 2004. Esnek Kaplama Malzemeleri El Kitabı, Asil Yayın Dağıtım, Ankara, 352s.
- [113] **Tuncan, M.**, 1997. “Endüstriyel Atıkların Asfalt Beton Kaplama Karışımında Değerlendirilmesi”, *Yüksek Lisans Tezi*, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- [114] **Ullidtz, P.**, 1987. Pavement Analysis, Elsevier, pp. 318, Amsterdam.
- [115] **Uluçaylı, M.**, 1998. Superpave ve Fransız Bitüm Şartnameleri. 2. Ulusal Asfalt Sempozyumu Bildirileri, Yollar Türk Milli Komitesi.
- [116] **Umar, F., Ağar, E.**, 1991. “Yol Üstyapısı”, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul.
- [117] **URL-1**, <http://www.kgm.gov.tr/Sayfalar/KGM/SiteTr/Kurumsal>, Karayolları Genel Müdürlüğü Resmi İnternet Sitesi. 02.05.2011.
- [118] **URL-2**, <http://www.tuik.gov.tr>, Türkiye İstatistik Kurumu Resmi İnternet Sitesi 03.05.2011.
- [119] **URL-3**, www.asmud.org.tr, Türkiye Asfalt Müteahhitleri Derneği 05.05.2011.
- [120] **Uşar, Ü.**, 2007. “Polipropilen Fiber Katkılı Yoğun Bitümlü Karışımların Tekrarlı Sünme Deneyindeki Reolojik Davranışlarının İncelenmesi”, *Yüksek Lisans Tezi*, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- [121] **Ünal, E. N.**, 1997, “Asfaltın Kalite Özelliklerinin Katkı Maddesi ile İyileştirilmesi”, *Doktora Tezi*, G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 31-36.
- [122] **Üstümkol, F.N., Turabi, A.**, 2010. Endüstriyel Atık Filler Malzemelerin Kullanılabilirliğinin Araştırılması, *BAÜ FBE Dergisi*, 12, 3-18.
- [123] **Warden, W. B, Hudson, S.B, and Howel, H.C.**, 1952. “Evaluation of Mineral Filler In Terms of The Association of Asphalt Paving Technologists” 27:101-110.
- [124] **Wasti, Y.**, 1990, “Uçucu Küllerin Geoteknik Özellikleri ve Kullanım Olanakları”, İMO, Teknik Dergi, Cilt:1, Sayı:4, Ankara, 177-188.
- [125] **Whiteoak, D., Read, J.**, 2003. The Shell Bitumen Handbook, London, Thomas Telford Ltd., 464 s.

- [126] **Whiteoak, D.**, 2004. “Shell Bitüm El Kitabı”, Editörleri, Abdullah Hilmi Lav, M. Ayşen Lav, İstanbul Büyükşehir Belediyesi İstanbul Asfalt Fabrikaları Sanayi ve Ticaret A.Ş., İstanbul, 33-34, 47, 50, 101-114, 123, 133-136, 148, 150-159.
- [127] **Xue, Y., Hou,H., Zhu, S.,Zha, J.**, 2008. Utilization of Municipal Solid Waste Incineration Ash İn Stone Mastic Asphaltmixture: Pavement Performance and Environmental İmpact, *Construction and Building Materials*, 23, 989-996.
- [128] **Yıldırım, B.**, 1984. Yol İnşaatı, Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayını, Elazığ, 181s.
- [129] **Yıldırım, Y.**, 2007. Polymer Modified Asphalt Binders, *Construction and Building Materials* 21, 66-72
- [130] **Yıldız, K.**, 2003. “Marshall Dizayn Metodu ile Optimum Bitüm Muhtevasının Belirlenmesinde Deney Parametrelerinin Sonuca Etkisi”, *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [131] **Yılmaz, A.**, 2008. “Ferrokrom ve Siliferochrom Cürufları ile Silis Dumanının Yol Üstyapısında Kullanımının İncelenmesi”, *Doktora Tezi*, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- [132] **Yılmaz, A., Sütaş, İ.**, 2005. Ferrokrom Cürufu Kullanılarak Hazırlanan Asfalt Betonu Numunelerinin Mühendislik Özellikleri, *Antalya Yöresinin İnşaat Mühendisliği Sorunları Kongresi*, Antalya. Eylül 22-24.
- [133] **Yılmaz, M.**, 2005. “Polyester Reçinenin Bitüm ve Bitümlü Sıcak Karışımlar Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması”, *Yüksek Lisans Tezi*, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [134] **Yılmaz, M.**, 2011. “Asfaltitin Bitümlü Sıcak Karışımların Mekanik Özellikleri Üzerindeki Etkisinin Araştırılması”, *Doktora Tezi*, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [135] **Yılmaz, M., Kök, B.V.**, 2008. Stiren-Butadien-Stiren Modifiyeli Bitümlü Bağlayıcıların Superpave Sistemine Göre Yüksek Sıcaklık Performans Seviyesinin ve İşlenebilirliğinin Belirlenmesi, *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.*, 23, 811-819.
- [136] **Yılmaz, M. ve Kök, B.V.**, 2009. Effects of Ferrochromium Slag with Neat and Polymer Modified Binders in Hot Bituminous Mix, *Indian Journal of Engineering & Materials Sciences*, 16 (5), 310-318.

- [137] **Yollar Fenni Şartnamesi**, 1994. Karayolları Genel Müdürlüğü Yayınları, Ankara, 258-280s.
- [138] **Yücel, H.E.**, 2007. “The Effect of The Use of Polyfibers on Asphalt Mixture Properties”, *Yüksek Lisans Tezi*, Gaziantep Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Gaziantep.
- [139] **Zaniewski, J.P., Pumphrey, M.E.**, 2004. Evaluation of Performance Graded Asphalt Binder Equipment and Testing Protocol, Asphalt Technology Program, West Virginia University, Morgantown.
- [140] **Zimmer, F.V.**, 1970. “Fly Ash As Bituminous Filler”, In Proceedings of The 2nd Ash Utilization Symposium, Pittsburg, Pa., 10-11 March 1970, United States Department of Interior, Bureau of Mines, Washington, D.C.

ÖZGEÇMİŞ

Mustafa Ethem KİZİRGİL, 1961 yılında Elazığ'da dünyaya gelmiştir. İlkokul, ortaokul ve lise eğitimini Elazığ'da tamamlamıştır.

1981 yılında Elazığ Devlet Mimarlık Mühendislik Akademisi İnşaat Bölümüne girmiş, 1982 yılında YÖK Kanunu ile Akademi-Üniversite birleşmesinden sonra 1985 yılında Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Bölümünden mezun olmuştur. 1985-1993 yılları arasında özel bir inşaat şirketinde inşaat mühendisi olarak çalışmıştır. 1994 yılı Ocak ayından itibaren Fırat Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu İnşaat Bölümünde Öğretim Görevlisi olarak çalışmaktadır. 1998-2001 tarihinde F.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği ABD'da yüksek lisans eğitimini tamamlayarak İnşaat Yüksek Mühendisi ünvanı almıştır. Meslek Yüksekokulunda, 1996-1998 ve 2000-2004 tarihlerinde müdür yardımcısı olarak, 1997-2000 tarihinde İnşaat Teknikerliği Program Koordinatörü olarak ve 2007-2009 tarihinde Mobilya Dekorasyon Teknikerliği Program Koordinatörü olarak görev yapmıştır. 2009 yılından itibaren Malzeme ve Malzeme İşleme Teknolojisi Bölüm Başkanı olarak görev yapmaktadır. Bu görevlerden ayrı olarak 1996 yılından itibaren Teknik Bilimler MYO Endüstriye Dayalı Eğitim (EDE) Koordinatörü görevini yürütmektedir. Orta seviyede İngilizce bilmektedir. Evli ve iki çocuk babasıdır.