

**BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIMLARIN TRAFİK ETKİSİ ALTINDA
MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Yük. Müh. Ahmet Sertaç KARAKAŞ

**Doktora Tezi
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Necati KULOĞLU
TEMMUZ-2014**

T.C
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIMLARIN TRAFİK ETKİSİ ALTINDA
MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

DOKTORA TEZİ

Yük. Müh. Ahmet Sertaç KARAKAŞ

(04115202)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 26 Haziran 2014

Tezin Savunulduğu Tarih : 16 Temmuz 2014

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Necati KULOĞLU (F.Ü)

Diğer Jüri Üyeleri : Doç. Dr. Ertan EVİN (F.Ü)

Doç. Dr. Mehmet YILMAZ (F.Ü)

Doç. Dr. Baha Vural KÖK (F.Ü)

Yrd. Doç. Dr. Tacettin GEÇKİL (İ.Ü)

TEMMUZ-2014

ÖNSÖZ

Master ve doktora derslerini alarak bilgi dağarcığımı geliştirmemde ve doktora tez döneminde danışmanlığımı üstlenerek beni yönlendiren ve çalışmalarına ışık tutan değerli hocam sayın Prof.Dr. Necati KULOĞLU'na, çalışma konusu belirlenmesi, laboratuvar çalışmalarımın yürütülmesi ve çalışmalarımın her aşamasında yardımını esirgemeyen F.Ü. Mühendislik Fakültesi Ulaştırma A.B.D öğretim üyelerinden Doç.Dr. Baha Vural KÖK'e, benim gibi aynı anabilim dalında doktora çalışmasını tamamlayan, deneysel çalışmalarda ve DPT gibi projelerde beraber çalıştığım Doç.Dr. Mehmet YILMAZ'a, laboratuvar teknisyeni Seyfettin ÇİÇEK'e, çalışmalarına maddi destek sağlayan FÜBAP'a, tez ve deneysel çalışmalarından faydalandığım İnönü Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü öğretim üyelerinden Yrd.Doç.Dr. Tacettin GEÇKİL'e, konuyla ilgili makale çevirileri konusunda ve arazi çalışmalarında yardımcı olan İ.Ü. Yapı İşleri ve Teknik Daire Başkanlığı'ndan Dr. Barış SAYIN'a, yazı metninin tashihinde katkılarından dolayı Muzaffer AKDOĞAN'a, Marmara Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Arş.Gör. Faruk ÖRTEŞ'e, makale taramaları konusunda D.Ü. Mühendislik Fakültesi öğretim üyelerinden Doç.Dr. S.Özgür DEĞERTEKİN'e, arazi ölçüm cihazlarının okumalarında yardımcı olan İ.Ü. Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Öğretim Üyesi Yrd.Doç.Dr. Erdem DAMCI'ya, konu belirlenmesi bakımından görüş ve bilgilerini aldığım değerli İTÜ İnşaat Fakültesi öğretim üyelerinden Prof.Dr. Emine AĞAR ve Prof.Dr. Abdullah Hilmi LAV'a, çalışmalarında görüşlerine başvurduğum Bahçeşehir Üniversitesi UYGAR (Ulaştırma Uygulama Araştırma Merkezi) Başkanı Prof.Dr. Mustafa ILICALI'ya, diğer üniversite bölüm hocalarıyla görüşmeme aracı olan UYGAR Proje koordinatörü Dr. Nilgün CAMKESEN'e, arazi çalışmalarında yardımlarını esirgemeyen ve diğer birimlerdeki kişilerle görüşmelerime olanak sağlayan İstanbul Büyükşehir Belediyesi Fen İşleri Daire Başkanı Abdurrahman UÇAK'a, asfalt uygulama alanı bakımından danıştığım ve görüşlerini aldığım İstanbul Büyükşehir Belediyesi Yol Bakım ve Onarım Müdürü Mehmet ÖZÇELİK'e ve İstanbul Büyükşehir Belediyesi Merter Alt Yapı Hizmet Müdürü Şerafettin Usta Bey'e, laboratuvar çalışmaları konusunda BİMTAŞ laboratuvarlarından yararlanmam ve karot numunelerini almam konusunda yardım ve desteklerini esirgemeyen Boğaziçi İnşaat Müşavirlik A.Ş.(BİMTAŞ) Genel Müdürü Ahmet AĞIRMAN'a, BİMTAŞ'tan Teknik Müdür Makine Mühendisi Enver BÜYÜK'e,

laboratuvar müdürü Nilgün ÇEKER'e, BİMTAŞ laboratuvarlarını gezdiren Jeofizik Mühendisi Ünal ÇELİKEL'e, zemin laboratuvarı denetçi Mühendisi Turan AKBULUT'a, bölgenin zemin durumuyla ilgili doküman temini sağladığım Jeoloji Mühendisi Ayşe BÜYÜKOĞLU'na, karot numunelerini almam konusunda arazi çalışmalarına birlikte katıldığımız İnşaat Mühendisi Mahmut GÜNDİZGİDEN ve numuneleri almamda özveriyle çalışan laborantlar Osman KARAHAN ve Duran KARATAŞ'a, karot alınan yerlerin soğuk asfalt malzemesi ile doldurulması bakımından malzeme temininden faydalandığım İSFALT A.Ş.'den Sibel KOCABAŞ'a ve Ümraniye plenti tesisi yetkililerine, deneysel çalışma uygulanması konusunda desteklerini ve yardımlarını esirgemeyen İSFALT A.Ş yetkililerine ve laboratuvar çalışmalarına aracı olan ve yön çizen İSFALT A.Ş. Kalite Yönetim ve ARGE Müdürlüğü'nden Teknik Eğitim Şefi Mehmet Tahir DENİZ'e, ARGE şefi Aydın TOPÇU'ya, Laboratuvar Şefi Seyit Ali YILDIRIM'a, asfalt uygulama alanı olarak belirlediğim Küçükçekmece Belediyesi sınırları içerisinde yer alan bölgeyle ilgili izinlerine başvurduğum ve çalışmalarında önümü görmemi sağlayan Küçükçekmece Belediyesi yetkililerine, özellikle görüşlerine başvurduğum belediye personellerinden Küçükçekmece Belediyesi Fen İşleri Müdürlüğü çalışanlarına, Küçükçekmece Belediyesi Yol Bakım Müdürlüğü'nden çalışanlara ayrıca asfalt dökümü sırasında yol bakım onarım personellerinden Deniz ÖZER'e, plentlerde modifiyesiz normal bitümlü sıcak karışım asfalt numunelerinin hazırlanmasını sağlayan Asfaltsan Asfalt Taahhüt İnşaat Sanayi ve Ticaret Limited Şirketi yetkililerine ve laboratuvar deneysel çalışmalarını yapan, sonuçları konusunda yardımlarını aldığım Kimyager Barış BAŞSÜLLÜ'ye, normal BSK karışımların uygulama alanındaki yola serilmesinde destek ve katkı sunan Doğan İnşaat Asfalt ve Ticaret Limited Şirketi yetkili ve çalışanlarına, çalışmalarımın temelini oluşturan normal BSK karışımla modifiye BSK karışımların karşılaştırılması ile ilgili SBS katkılı asfaltın temini ve yola uygulaması konusunda çalışmamın yapıtaşını oluşturmamı sağlayan ve destek sunan İstanbul Ulaşım Hat ve Sabit Tesisler Müdürü Dr. Veysel ARLI'ya ve İnşaat Teknikeri Mehmet ÇAKIL'a, onlarla görüşmeme ön ayak olan İstanbul Üniversitesi Yapı İşleri ve Teknik Daire Başkanlığı çalışanlarından Mak.Yük.Müh. Gürkan KAYIMOĞLU'na, plentlerde hazırlanan modifiyeli SBS katkılı BSK'nın hazırlanmasını sağlayan ATİS Asfalt Taahhüt İnşaat Sanayi ve Ticaret Limited Şirketi yetkililerine, firma laboratuvarından sorumlu ve deneysel çalışma sonuçlarına başvurmam konusunda yardımcı olan Mak.Müh. Mehmet NEŞELİ'ye, plentte hazırlanan BSK'larla ilgili agrega, bitüm ve dizayn karışım deneylerini yapan Karayolları Genel

Müdürlüğü 17.Bölge Müdürlüğü Araştırma Baş Mühendisliği çalışanlarına,SBS katkılı BSK karışımının plentten getirilip yola serilmesini sağlayan Seven Mühendislik İnşaat Sanayi Ticaret Limited Şirketi yetkililerinden Mustafa ONAY ve gece yarılarında kadar özveriyle asfalt döküm işlerini gerçekleştiren Teknik sorumlu Suat Suiçmez ile firma çalışanlarına, test çekici alımı gerçekleştiren FORE Test Cihazları İmalat Sanayi ve Uluslararası Ticaret A.Ş.'den Genel Müdür Mimar Cem YILMAZ'a, trafik ölçüm cihazının A.B.D'den temin edilmesini sağlayan İntetra Elektrik ve Elektronik Sanayi İç ve Dış Ticaret Limited Şirketi'ne, firma Müdürü Mehmet ÖMERBEYOĞLU'na, NC100/200 mobil trafik ölçüm cihazı hakkında teknik bilgi ve cihaz alımı konusunda yardımcı olan Satış ve Pazarlama Müdürü Burcu ÖZKAN'a, yazılım konusunda bilgilerini aldığım Bilgisayar Mühendisi ve AR-GE Mühendisi Tolga ALASAĞ'a, cihazın modifiyeli ve modifiyesiz asfalta uygulanmasını sağlayan ve teknik anlamda katkı sağlayan Teknik Servis Sorumlusu Mustafa ÇELİK'e, İstanbul Üniversitesi Yapı İşleri ve Teknik Daire Başkanlığı çalışma arkadaşlarıma, ismini sayamadığım diğer yetkililere, hocalara, çalışan personellere, akrabalarım, arkadaşlara da yardımlarından dolayı teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca bugünlere gelmemde benden sevgilerini ve yardımlarını esirgemeyen iyi, kötü ve zor zamanlarımda daima yanımda olan, manevi yönden desteğini aldığım her zaman özveride bulunan ailemden anneme, kardeşime, eşime, hiçbir zaman unutmayacağım, her bakımdan destek sunan, değerli aile büyüğümüz rahmetli babam Mimar Hüseyin Serdar KARAKAŞ'a teşekkürü bir borç bilirim.

Bu tez çalışmasındaki emeğimi babama ithaf ediyorum.

Ahmet Sertaç KARAKAŞ
Elazığ - 2014

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ	I
İÇİNDEKİLER	IV
ÖZET	VIII
SUMMARY	X
ŞEKİLLER LİSTESİ	XII
TABLolar LİSTESİ	XVIII
SEMBOLLER LİSTESİ	XXII
KISALTMALAR	XXIV
1. GİRİŞ	1
1.1. Genel Bilgiler	1
1.2. Araştırmanın Amacı ve Kapsam	2
1.3. Araştırmanın Önemi	3
1.4. Araştırma Materyali ve Metod	3
1.5. İlgili Literatür Bakımından Çalışmanın Yeri	4
2. KARAYOLU YAPISI	22
2.1. Karayolu Alt Yapısı	22
2.2. Karayolu Üst Yapısı	23
2.2.1. Kaplama Tabakaları	24
2.2.1.1. Asfalt Beton Kaplamalar	26
2.2.1.2. Asfalt Betonunun Hazırlanması	30
2.2.2. Temel Tabakaları	34
2.2.3. Alt Temel Tabakası	39
2.2.4. Temel ve Alt temel Tabakalarının Serimi ve Sıkıştırılması	40
3. BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIMLAR	43
3.1. Bitümlü Sıcak Karışımlarda Kullanılan Malzemeler	43
3.1.1. Bitümlü Bağlayıcı ve Davranışları	43
3.1.1.1. Bitümün Yüksek Sıcaklık Davranışı	46
3.1.1.2. Bitümün Düşük Sıcaklık Davranış	46
3.1.1.3. Bitümün Normal Sıcaklık Davranış	47
3.1.1.4. Bitümün Yaşlanma Davranış	47
3.1.2. Agregalar	49
3.1.2.1. Agregaların Minerolojik Sınıflandırması	49
3.1.2.2. Agregaların Boyut Sınıflandırması	50
3.1.2.3. Agregaların Biçim Sınıflandırması	50
3.1.2.4. Agregaların Boşluk ve Yüzey Alanı Sınıflandırması	51
3.1.2.5. Agregaların Özgül Ağırlık Sınıflandırması	51
3.1.2.6. Agregaların Porozite Sınıflandırması	52
3.1.2.7. Agregaların Yüzey Yapısı Sınıflandırması	53
4. ASFALT BETONU KAPLAMALARDA ARANAN ÖZELLİKLER VE MEYDANA GELEN BOZULMALAR	54
4.1. Asfalt Beton Kaplamalarda Aranan Özellikler	54
4.1.1. Stabilitate	54
4.1.2. Durabilite (Dayanıklılık)	55

4.1.3.	Rijitlik	56
4.1.4.	Esneklik	56
4.1.5.	Kaymaya Karşı Direnç	57
4.1.6.	Yorulmaya Karşı Direnç	57
4.1.7.	İşlenebilirlik	58
4.1.8.	Geçirimsizlik	59
4.2.	Asfalt Betonu Kaplamalarda Görülen Bozulmalar	60
4.2.1.	Deformasyon Kusurları	61
4.2.1.1.	Tekerlek İzleri	62
4.2.1.1.1.	Yüzeysel Tekerlek İzi	63
4.2.1.1.2.	Yapısal Tekerlek İzi	64
4.2.1.1.3.	Akma Tekerlek İzi	64
4.2.1.2.	Lastik Deseni (Paterni)	66
4.2.1.3.	Ondülasyonlar	67
4.2.1.4.	Oturmalar (Bölgesel çökmeler)	68
4.2.1.5.	Kabarmalar	69
4.2.1.6.	Yığılmalar	70
4.2.1.7.	Üniform Olmayan Düzensiz Yüzey Bozuklukları	70
4.2.2.	Ayrışma Kusurları	71
4.2.2.1.	Folluk Tipi Oyuklar	71
4.2.2.2.	Sökülmeler	72
4.2.2.3.	Tabaka Halindeki Sökülmeler	73
4.2.2.4.	Kusma	73
4.2.2.5.	Kayganlık	74
4.2.2.6.	Cilalanma	74
4.2.2.7.	Soyulma	74
4.2.3.	Çatlamalar	75
4.2.3.1.	Stabilite Çatlakları	75
4.2.3.2.	Yorulma Çatlakları	76
4.2.3.3.	Yansıma Çatlakları	77
4.2.3.4.	Timsah Sırtı Çatlaklar	78
4.2.3.5.	Kenar Çatlakları	79
4.2.3.6.	Derz Çatlakları	80
4.2.3.7.	Enine Çatlaklar	80
4.2.3.8.	Yüzey Kayması Çatlakları	81
4.2.3.9.	Düşük Sıcaklık Çatlakları	82
5.	BİTÜM MODİFİKASYONU	84
5.1.	Modifikasyonun Amacı	84
5.2.	Modifiyerlerin (Katkıların) Bitümlü Karışımlardaki Özellikleri	86
5.3.	Katkı Maddelerinin Kullanım Yöntemleri	87
5.4.	Bitüm Katkı Maddelerinin Sınıflandırılması	88
5.5.	Modifiye Bitüm Tipleri ve Teknik Özellikleri	90
5.6.	Polimer Olmayan Katkılarla Bitüm Modifikasyonu	91
5.7.	Polimer Katkılarla Bitüm Modifikasyonu	91
5.7.1.	Kauçuk İlaveli Bitüm Modifikasyonu	92
5.7.2.	Bitüm Modifikasyonunda Stiren-Butadien-Stiren (SBS) Blok Kopolimer Kullanımı	92

5.7.2.1.	SBS Polimer Katkılı Bitümlerin Özellikleri	97
6.	DENEYSEL ÇALIŞMA YÖNTEMLERİ	101
6.1.	Bağlayıcı Deneyleri	101
6.1.1.	Penetrasyon Deneyi (TS 118 EN 1426)	101
6.1.2.	Yumuşama Noktası Deneyi (TS 118 EN 1427)	102
6.1.3.	Düktilite Deneyi (TS 119)	102
6.1.4.	Fraas Kırılma Noktası Deneyi	103
6.1.5.	Asfalt Bağlayıcı Özgül Ağırlık Deneyi	104
6.2.	Agrega Deneyleri	104
6.2.1.	Agrega Özgül Ağırlıkları	104
6.2.2.	Los Angeles Aşınma Deneyi	105
6.2.3.	Agrega Gradasyonu	108
6.2.4.	Yassılık İndeksi Tayini Deneyi	109
6.2.5.	Agrega Kırılmışlık Yüzdesi Tayini	110
6.2.6.	Hava Tesirlerine Karşı Dayanıklılık Deneyi	111
6.3.	Bitümlü Karışımlara Uygulanan Deneyler	111
6.3.1.	Marshall Metodu ile Karışım Dizaynı	112
6.3.1.1.	İndirekt Çekme Dayanımı Deneyi (ITS)	116
6.3.1.2.	İndirekt Çekme Rijitlik Modülü Deneyi (ITSM)	117
6.3.1.3.	İndirek Çekme Tekrarlı Yorulma Deneyi	119
6.3.1.4.	Dinamik Sünme Deneyi	123
6.4.	Arazi Deneyi Uygulama Yöntemleri	126
6.4.1.	Trafik Ölçümünde Kullanılan NC 100-200 Trafik Analiz Cihazının Özellikleri	126
6.4.1.1.	QTT Trafik Analiz Cihazı ile Haberleşme	127
6.4.1.2.	QTT Trafik Analiz Cihazının Kurulumu ve Alınması Gereken Tedbirler	128
6.4.1.3.	Yükleme Verileri - QTT Trafik Analiz Cihazının Okunması	129
6.4.1.4.	Mobil Trafik Analiz Cihazı Teknik Özellikleri	130
6.4.2.	Karot Numunelerinin Alımı	134
6.4.3.	Nükleer Yoğunluk Cihazı Deneyleri	135
6.4.4.	Schmidt Çekici ile Yapılan Arazi Deneyleri	136
6.4.5.	Tekerlek İzi Ölçümleri	137
7.	DENEYSEL ÇALIŞMA	139
7.1.	Deneysel Çalışma Uygulama Alanı	139
7.2.	Deneysel Çalışma Safhaları	141
7.2.1.	Laboratuvar Çalışmaları	141
7.2.1.1.	Bitümlü Bağlayıcı Deney Sonuçları	142
7.2.1.2.	BSK Karışımlarda Kullanılan Agregaların Özellikleri	143
7.2.1.3.	Temel Tabakasında Kullanılan Agregaların Özellikleri	147
7.2.1.4.	Bitümlü Sıcak Karışım Özelliklerinin Belirlenmesi	151
7.2.2.	Arazi Çalışmaları	165
7.2.2.1.	Arazi Ölçüm Cihazı Uygulaması	167
7.2.2.2.	Aşınma Tabakası Karot Numunelerinin Alınması	167
7.2.2.3.	Nükleer Yoğunluk Ölçer Cihazıyla Sıkıştırma Yüzdesi Tayini	170
7.2.2.4.	Numunelerin Alındığı Kesimlerdeki Tekerlek İzi Ölçümleri	176
7.2.2.5.	Numunelerin Alındığı Kesimlerdeki Schmidh Test Çekici Ölçümleri	178

7.2.2.6.	Deneme Yolu Trafik Ölçüm Değerleri	185
7.2.2.7.	Katkısız BSK Yüzey Sıcaklık Ölçüm Değerleri	187
7.2.2.8.	SBS Katkılı BSK Yüzey Sıcaklık Ölçüm Değerleri	191
7.2.2.9.	Katkısız ve SBS Katkılı BSK Yüzey Sıcaklık Ölçüm Değerlerinin Karşılaştırılması	194
7.2.2.10.	Katkısız ve SBS Katkılı BSK Yol Yüzeyi Taşıt Hız Değişimleri	199
7.2.2.11.	Arazi Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması	202
7.2.3.	BSK Karot Numuneleri Hacimsel Deney Sonuçları	205
7.2.3.1.	BSK Karot Numuneleri Boşluk Oranı Değişimleri	208
7.2.3.2.	BSK Karot Numuneleri Agregalar Arası Boşluk Oranı Değişimleri	210
7.2.3.3.	BSK Karot Numuneleri Asfaltla Dolu Boşluk Oranı Değişimleri	212
7.2.4.	Kontrol ve Karot Numunelerine Ait Marshall Deneyi Uygulaması	214
7.2.4.1.	Laboratuvarda Hazırlanan Numunelerin Marshall Deney Sonuçları	214
7.2.4.2.	Karot Numunelerinin Marshall Deneyi Sonuçları	215
7.2.5.	Laboratuvar ve Karot Numunelerine Ait Çekme Dayanımı (ITS) Deney Sonuçları	222
7.2.5.1.	Laboratuvar Kontrol Numuneleri ITS Deney Sonuçları	222
7.2.5.2.	Katkısız ve SBS Katkılı Karot Numuneleri ITS Deney Sonuçları	224
7.2.6.	Laboratuvar ve Karot Numunelerine Ait İndirekt Çekme Rijitlik Modülü (ITSM) Deney Sonuçları	229
7.2.6.1.	Laboratuvar Kontrol Numuneleri ITSM Deney Sonuçları	229
7.2.6.2.	Katkısız ve SBS Katkılı Karot Numuneleri ITSM Deney Sonuçları	231
7.2.7.	Laboratuvar ve Karot Numunelerine Ait İndirekt Çekme Yorulma Deneyi Sonuçları	236
7.2.7.1.	Laboratuvar Ortamında Hazırlanan Numunelerin İndirekt Çekme Yorulma Deney Sonuçları	237
7.2.7.2.	Karot Numunelerinin İndirekt Çekme Yorulma Deneyi Sonuçları	239
7.2.8.	Karot Numunelerine Ait Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması	247
8.	SONUÇ ve ÖNERİLER	252
	Kaynaklar	255
	Özgeçmiş	270

ÖZET

Bu tez çalışmasında stiren-butadien-stiren (SBS) modifiyesinin, bitümlü sıcak karışımlarda katkı malzemesi olarak kullanımının etkisi araştırılmıştır. Saf ve SBS içeren bitümlü sıcak karışımların (BSK) tasarımları Marshall yöntemine göre yapılmıştır. BSK'larda kullanılan agrega, bitüm ve dizayn parametrelerine ait önceden tespit edilen özellikler, kontrol amaçlı deneysel olarak tekrar tespit edilmiş ve karşılaştırmaları yapılmıştır. Arazi ve laboratuvar deneylerinin yürütüleceği kent içi yol trafiğine sahip alanda, saf ve SBS içerikli BSK'lar granüler temel tabakasının bulunduğu yol güzergahı üzerinde uygulama sahası oluşturmak için iki farklı türde asfalt betonu kaplaması olarak uygulanmıştır.

Arazi deneyi olarak bitümlü sıcak karışımların trafik yükü altındaki davranışlarını belirlemek için uygulama sahasında oluşturulan asfalt betonu kaplaması üzerinde, bir yıllık zaman periyodundaki 1, 4, 8 ve 12. aylarda trafik ölçüm cihazıyla, kaplama yüzey sıcaklıkları ve geçen taşıt sayısına bağlı eşdeğer standart dingil yükü sayıları tespit edilmiştir. Ayrıca mekanik özelliklerinin belirlenmesi için test çekiciyle dayanım, kumpas ile tekerlek izi ve nükleer test cihazı ile sıkıştırma ölçümleri yapılmıştır. Yol kenarındaki sıkıştırma dereceleri ortalamaları tekerlek geçiş bölgelerindekine göre daha düşük olup, SBS katkılı asfalt betonu kaplamalardaki sıkıştırma derecesi ortalaması bir yıllık periyotta daha büyük değerde çıkmıştır. Tekerlek izi derinlikleri olarak katkısız BSK'lardaki tekerlek izi ölçümleri ortalama değeri, SBS katkılı sıcak karışımlardaki tekerlek izi ölçüm ortalamasına göre yaklaşık %50 daha fazla olduğu görülmüştür. Schmith çekiciyle yapılan sıkıştırma derecesine yönelik ölçümlerde ise yol kenar bölgelerinde her iki asfalt betonu kaplama için 8. ay ve 12. ayda en büyük ve birbirine yakın değerler elde edilmiş, tekerlek geçiş bölgelerinde ise en büyük sıkıştırma derecesi 12. ayda katkısız asfalt betonu kaplamalarda görülmüştür.

Laboratuvar deneyleri, saf ve SBS modifiyeli BSK dizayn özellikleri ile belli periyotlarda temin edilen karot numuneleri üzerinde uygulanmıştır. Bitümlü sıcak karışımları oluşturan malzemelerin özellikleri ile karışıma ait fiziksel, mekanik ve performans özellikleri laboratuvar deneyleri ile tespit edilmiştir.

Katkısız asfalt betonu ve SBS modifiyeli asfalt betonu kaplaması aşınma tabakası tipII dizayn çalışması agrega ve bitüm fiziksel özelliklerinin ve dizayn özelliklerinin Karayolları Genele Müdürlüğü (KGM) Karayolları Teknik Şartnamesi (KTŞ) Kriterlerinin çoğunu sağladığı görülmüştür. Saf ve modifiyeli bitümlerin penetrasyon indeksi bakımından ısıya az

duyarlı olduğu belirlenmiştir. Yumuşama noktası olarak şartname limitlerinin üzerinde bir değere sahip oldukları, diğer özellikler bakımından da şartname limitlerini sağladığı grlmştir.

Karot numunelerine ait hacimsel parametrelerinde ise aylık periyotlarda boşluk oranı ve agregalar arası boşluk oranı değerlerinin düştüğü asfaltla dolu boşluk oranının yükseldiği grlmştir.

Kontrol ve karot numunelerine uygulanan; Marshall deneyleri sonucunda; SBS modifiyeli BSK numunelerinin saf numunelere göre daha büyük stabilite ve Marshall oranı (MQ) değerine sahip olduğu, bir yıllık periyotta stabilite, Marshall oranı (MQ) değerlerinin arttığı akma değerlerinin azaldığı belirlenmiştir. En büyük stabilite değerlerinin 12. aydaki yol kenar bölgesinden temin edilen SBS modifiyeli karot numunelerinde grlmştir. Çekme dayanımı oranı deneyleri sonucunda, SBS kullanılmasıyla ve aylık periyotlar arttıķa karışımların çekme dayanımı değerlerinin arttığı belirlenmiştir. İndirekt ekme rijitlik modülü deneyleri sonucunda, SBS kullanıldıķķa ve aylık zaman periyodu arttıķa karışımların rijitliğinin arttığı tespit edilmiştir. İndirekt ekme yorulma deneyleri sonucunda, SBS modifiyeli BSK'ların saf BSK'lara göre yorulma ömürlerinin büyük olduğu, aylık periyotlar arttıķa yorulma ömrünün arttığı belirlenmiştir. Ayrıca deformasyonun azalması nedeniyle daha gevrek bir kırılmanın meydana geldiği tespit edilmiştir. En büyük indirekt çekme dayanımları, indirekt çekme rijitlik modülleri ve yorulma dayanımları, yol kenar blgesinden alınan SBS modifiyeli karot numunelerinden elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Bitümlü Sıcak Karışım, Stiren-Butadien-Stiren, Marshall Deneyi, İndirekt ekme Dayanımı, İndirekt ekme Rijitlik Modülü, Yorulma.

SUMMARY

Investigation of Mechanical Properties of Hot Mix Asphalts Under The Traffic Effect

In this thesis study, the effect of using modified SBS in hot mix asphalts (HMAs) as an additive has been searched. Pure and SBS including HMAs have been designed according to Marshall method. The properties of aggregate used in HMAs, bitumen and HMAs design parameters that has been determined again experimentally with the aim of controlling and have been compared. In area which has local traffic and used for carrying out land and laboratory experiments, two different types of asphalt concrete pavement applied in order to make up application area granular base course.

As a land experiment, pavement surface temperature and axle load related to vehicle numbers have been identified by traffic measuring devices in 1st, 4th, 8th and 12 th months in one year to specify behaviour of HMAs under the effects of traffic load on the asphalt concrete pavement that is prepared in the application area. Moreover, wheel tracking measurement with calliper, strength measurement with test hammer and compression measurement with nuclear test device have been done in order to specify mechanical properties. Compression rates in road side is lower than wheel zone, beside this, average compression rate of asphalt concrete pavement modified with SBS is higher than pure asphalt pavement in one year period. Mean value of wheel tracking measurements in pure asphalt concrete pavement is bigger than asphalt concrete pavement modified with SBS about 50 percent. The maximum and close values of compression rate have been gathered in 8th and 12th months for both asphalt pavements, besides the maximum compression rate value have been obtained for pure asphalt pavement in 12th month for wheel zone in compression rate measurement using Schmith hammer.

The laboratory experiments have been applied on properties of pure and SBS including HMAs and design parameters are provided from application area and cores test pieces that have been provided periodically. It has been seen that type II design of pure and SBS including HMAs asphalt pavements friction layer, physical properties and design parameters of bitumen and aggregate provide KGM scientific criteria. Modified and pure HMAs have a little sensibility to heat in terms of penetration index is determined. They exceed scientific criteria limits in terms of softening points besides providing all the others criteria limits.

Experimental results about bitumen and aggregate and the results that gathered from experiments aimed to control are in criteria limits and accordant with each other.

A rising in ratio of voids filled with asphalt, a decrease air space ratio in montly period and space percentage between agregates as volumetric parameters of core test pieces have been seen.

As a result of Marshall experiments, SBS modified HMAs test pieces have a greater value of stability and Marshall ratio(MQ). Increasing in stability and Marshall ratio, decreasing in yield values have been determined. Maximum stability value have been gathered from 12th month road side zone SBS modified HMAs core test pieces. As a result of applying tension experiments to control and test pieces, tensile strength increases with SBS usage and increasing time periods. As a result of indirect tensile stiffness modulus experiments, the strength of mixture increases with SBS usage and inceasing time periods. As a result of indirect tensile fatigue experiments, fatigue life of SBS modified HMAs are greater than fatigue life of pure HMAs, additionally, it is determined that fatigue life increases with increasing month periods. Moreover, brittle fracture is observed due to decreasing deformation. Maximum indirect tensile strenght, indirect tensile stiffness modulus and fatigue strength is determined in road side zone SBS modified HMAs core test pieces.

If experiments results is taken into consideration, strength and stability oppose plastic deformation and fatigue fracture enhance with increasing SBS content, in contrast with occurence of more brittle fracture has been determined.

Keywords: Hot Mix Asphalt, Styrene-Butadiyne-Styren, Marshall Test, Indirect Tensile Stiffness Modulus, Indirect Tensile Stiffness Modulus, Fatigue.

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1.	Karayolu üst yapı tabakaları ve türleri	23
Şekil 2.2.	Üst yapının rijitlik durumlarına göre sınıflandırılması	24
Şekil 2.3.	Agrega gradasyonu dağılımı	25
Şekil 2.4.	Agrega gradasyon çeşitleri	26
Şekil 2.5.	Asfalt betonu üstyapı tabakaları	27
Şekil 2.6.	Bitümlü asfalt karışımın elde edildiği harman plenti	31
Şekil 2.7.	Sıkıştırma makineleri tipleri	33
Şekil 2.8.	BSK'nın finişerle yola serilmesi ve silindirlerle sıkıştırılması	33
Şekil 2.9.	BSK'nın hazırlanması ve uygulanması aşamaları	34
Şekil 2.10.	Plent-miks temel tabakası yapımı	37
Şekil 2.11.	Sıkıştırma yüzdesi tayininde kullanılan nükleer metot deney cihazı	42
Şekil 3.1.	Asfaltın sıcaklığa göre yük altındaki davranışı	45
Şekil 3.2.	Asfaltın zaman ve sıcaklığa göre davranışı	46
Şekil 3.3.	Sıvı akış özelliklerinin mikroskobik görünüşü	46
Şekil 3.4.	BSK'ların yıllara göre yaşlanma indeksi	48
Şekil 3.5.	Agregaların iki boyutlu dane biçim sınıflandırması	50
Şekil 3.6.	Agregaların üç boyutlu dane biçim sınıflandırması	51
Şekil 3.7.	Agreganın özgül ağırlık hesaplamalarında dikkate alınan hacimleri	52
Şekil 3.8.	Poroz sınıflandırması	53
Şekil 3.9.	Agregaların pürüzlülük sınıflandırması	53
Şekil 4.1.	Kaplamada oluşan farklı dingil yüklerine bağlı deformasyonlar	63
Şekil 4.2.	Konsolidasyon ve yüzeysel tekerlek izi	64
Şekil 4.3.	Yapısal tekerlek izi	64
Şekil 4.4.	Akma tekerlek izi	65
Şekil 4.5.	Bitümlü bağlayıcı oranı ve tekerlek izi oluşum hızı arasındaki ilişki	66
Şekil 4.6.	Tekerlek izi oluşumu ve ölçümü	66
Şekil 4.7.	Asfalt betonu kaplama lastik deseni oluşumları	67
Şekil 4.8.	Asfalt betonu kaplama ondülasyonları	68
Şekil 4.9.	Asfalt betonu kaplamada görülen bölgesel çökmeler	69
Şekil 4.10.	Asfalt betonu kaplamasındaki oturmalar	69
Şekil 4.11.	Asfalt betonu kaplamasında görülen kabarma ve yığılmalar	70
Şekil 4.12.	Asfalt betonu üniform olmayan yüzey bozuklukları	71
Şekil 4.13.	Asfalt betonu kaplama folluk tipi oyuklar	72
Şekil 4.14.	Asfalt betonu kaplaması aşınma tabakası agregası kaybı	73
Şekil 4.15.	Asfalt kusması	73
Şekil 4.16.	Asfalt betonu kaplama cilalanması	74
Şekil 4.17.	Agregalardaki asfalt filmi soyulması	75
Şekil 4.18.	Asfalt betonundaki blok şeklindeki çatlamalar	75
Şekil 4.19.	Asfalt betonu yorulma çatlağı kusurları	76
Şekil 4.20.	Yorulma çatlakları	76
Şekil 4.21.	Asfalt betonu kaplama yansıma çatlağı	77
Şekil 4.22.	Yansıma çatlağının oluşumu	78
Şekil 4.23.	Asfalt betonu kaplamalardaki timsah sırtı çatlak bozulmaları	79

Şekil 4.24.	Asfalt betonu kaplama kenar çatlağı	79
Şekil 4.25.	Asfalt betonu kaplama boyuna derz çatlakları	80
Şekil 4.26.	Asfalt betonu kaplamadaki enine çatlaklar	81
Şekil 4.27.	Asfalt betonu kaplamalardaki kayma çatlağı	81
Şekil 4.28.	Düşük sıcaklık çatlağı şekilleri	82
Şekil 4.29.	Düşük sıcaklık çatlağının büyüme aşaması	83
Şekil 5.1.	Bitümün statik yükler karşısındaki davranışı	84
Şekil 5.2.	Bitümün dinamik yükler karşısındaki davranışı	85
Şekil 5.3.	Bölgelere göre modifiye bitüm kullanım tipleri	91
Şekil 5.4.	Termoplastik kauçuk modifiyeli asfaltların aromatiklik durumu	92
Şekil 5.5.	Kraton SBS yapısı	93
Şekil 5.6.	SBS türü polimerlerin yapısı	93
Şekil 5.7.	Bitümle karışım sıcaklığında ve düşük sıcaklıklarda SBS'in yapısı	94
Şekil 5.8.	SBS modifikasyonunda kullanılan ekipman	95
Şekil 5.9.	SBS katkı maddesinin genel görünümü ve üç boyutlu SBS yapısı	97
Şekil 5.10.	SBS bağ şekilleri	98
Şekil 5.11.	SBS moleküler yapısı	98
Şekil 5.12.	40°C'de dinamik sünme deneyinde zaman-kalıcı deformasyon ilişkisi...	99
Şekil 5.13.	Asfaltla kaplanmış SBS moleküllerinin üç boyutlu görünümü	100
Şekil 5.14.	SBS kaplı asfalt filminin fotomikrografik gösterimi ve bağ yapısı	100
Şekil 6.1.	Penetrasyon deney aleti	101
Şekil 6.2.	Yumuşama noktası deney aleti	102
Şekil 6.3.	Düktilite deney aleti ve aparatları	103
Şekil 6.4.	Frass kırılma noktası aparatları	103
Şekil 6.5.	Özgül ağırlık ölçer elektronik terazi	105
Şekil 6.6.	Agreganın hacim (a), zahiri (b) ve efektif (c) özgül ağırlık hacimleri	105
Şekil 6.7.	Agrega aşınma deneyi test cihazı	106
Şekil 6.8.	Agrega elek analizi titreşim cihazı ve elek seti takımı	108
Şekil 6.9.	Agrega konkasör şantiyesi	109
Şekil 6.10.	Yassı ve uzun daneleri ölçme test aparatı	110
Şekil 6.11.	Agrega ve bitümlerin ısıtıldığı etüvler	113
Şekil 6.12.	BSK numune hazırlanması ve silindir kalıba yerleştirilmesi	113
Şekil 6.13.	BSK numunelerin karıştırılması, sıkıştırılması ve kalıptan çıkarılması....	114
Şekil 6.14.	Değişik bitüm oranlarındaki deney numuneleri	114
Şekil 6.15.	Marshall numuneleri ve kürü	115
Şekil 6.16.	Marshall stabilite ve akma ölçüm cihazı	115
Şekil 6.17.	Çekme dayanımı deney düzeneği	117
Şekil 6.18.	İndirekt çekme rijitlik modülü (ITSM) deney cihazı ve düzeneği	118
Şekil 6.19.	İndirekt çekme tekrarlı yorulma deney düzeneği	120
Şekil 6.20.	Temsili deformasyon - yük tekerrür sayısı ilişkisi	122
Şekil 6.21.	Dinamik sünme deney düzeneği	124
Şekil 6.22.	Yük tekrar sayısı - şekil değiştirme ilişkisi	124
Şekil 6.23.	Yük - zaman ve deformasyon - zaman ilişkisi	125
Şekil 6.24.	QTT trafik analiz cihazı ve bağlantı elemanları	127
Şekil 6.25.	QTT NC-100/200 ara yüz iletişim bağlantı kabloları	128
Şekil 6.26.	Trafik ölçüm cihazı kurulumu	129
Şekil 6.27.	Mobil trafik analiz cihazı	130

Şekil 6.28.	NC 100-200 cihazı sensörlerinin araç hareketlerini manyetik görüntülemesi	131
Şekil 6.29.	Mobil trafik analiz cihaz kurulumu	132
Şekil 6.30.	HDM yazılım programı	132
Şekil 6.31.	Sınıf/araç sayısı grafiği	133
Şekil 6.32.	Trafik analiz cihazında bataryaların şarj edilmesi	134
Şekil 6.33.	Trafik analiz cihazı verilerinin aktarılması	134
Şekil 6.34.	Karot makinesi ile silindir asfalt numunesi alınması	135
Şekil 6.35.	Nükleer test cihazı ile yoğunluk ölçümü	136
Şekil 6.36.	Schmidt çekiciyle yüzey sertliği ölçümü	137
Şekil 6.37.	Asfalt betonu kaplama tekerlek izi ölçümü	138
Şekil 7.1.	İstanbul İli Küçükçekmece İlçesi karayolu ağı uydu görüntüleri	140
Şekil 7.2.	Küçükçekmece İlçesi Yarımburgaz Mahallesi Burcu Sokak uygulama yol sahası	141
Şekil 7.3.	BSK aşınma tabakası tip II elek analizi grafiği	145
Şekil 7.4.	BSK binder tabakası elek analizi grafiği	146
Şekil 7.5.	Uygulama sahası yol üst yapısı granüler temel tabakası	147
Şekil 7.6.	Bimtaş malzeme laboratuvarı	148
Şekil 7.7.	Granüler temel tabakası A tipi gradasyon limitlerine göre elek analizi ...	149
Şekil 7.8.	Granüler temel tabakası B tipi gradasyon limitlerine göre elek analizi ...	149
Şekil 7.9.	Asfaltsan ve Atis asfalt firması plant şantiyeleri	151
Şekil 7.10.	Katkısız asfalt betonu aşınma tabakası pratik özgül ağırlık ve bitüm oranı ilişkisi	156
Şekil 7.11.	Katkısız asfalt betonu aşınma tabakası stabilite ve bitüm oranı ilişkisi	156
Şekil 7.12.	Katkısız asfalt betonu aşınma tabakası akma ve bitüm oranı ilişkisi	156
Şekil 7.13.	Katkısız asfalt betonu aşınma tabakası asfaltla dolu boşluk ve bitüm oranı ilişkisi	157
Şekil 7.14.	Katkısız asfalt betonu aşınma tabakası boşluk ve bitüm oranı ilişkisi	157
Şekil 7.15.	Katkısız asfalt betonu aşınma tabakası agregalar arası boşluk ve bitüm oranı ilişkisi	157
Şekil 7.16.	Modifiye asfalt betonu aşınma tabakası pratik özgül ağırlık ve bitüm oranı ilişkisi	159
Şekil 7.17.	Modifiye asfalt betonu aşınma tabakası stabilite ve bitüm oranı ilişkisi	159
Şekil 7.18.	Modifiye asfalt betonu aşınma tabakası akma ve bitüm oranı ilişkisi	159
Şekil 7.19.	Modifiye asfalt betonu aşınma tabakası asfaltla dolu boşluk ve bitüm oranı ilişkisi	160
Şekil 7.20.	Modifiye asfalt betonu aşınma tabakası boşluk ve bitüm oranı ilişkisi	160
Şekil 7.21.	Modifiye asfalt betonu aşınma tabakası agregalar arası boşluk ve bitüm oranı ilişkisi	160
Şekil 7.22.	Katkısız asfalt betonu binder tabakası pratik özgül ağırlık ve bitüm oranı ilişkisi	163

Şekil 7.23.	Katkısız asfalt betonu binder tabakası stabilite ve bitüm oranı ilişkisi	163
Şekil 7.24.	Katkısız asfalt betonu binder tabakası akma ve bitüm oranı ilişkisi	163
Şekil 7.25.	Katkısız asfalt betonu binder tabakası asfaltla dolu boşluk ve bitüm oranı ilişkisi	164
Şekil 7.26.	Katkısız asfalt betonu binder tabakası boşluk ve bitüm oranı ilişkisi	164
Şekil 7.27.	Katkısız asfalt betonu binder tabakası agregalar arası boşluk ve bitüm oranı ilişkisi	164
Şekil 7.28.	BSK astar uygulaması	165
Şekil 7.29.	Normal BSK uygulaması	166
Şekil 7.30.	SBS modifiyeli BSK uygulaması	166
Şekil 7.31.	Normal ve SBS katkılı esnek yol kaplaması yapımı	167
Şekil 7.32.	Trafik analiz ölçüm cihazı montajı	167
Şekil 7.33.	Aşınma tabakası karot alımı (ölçeksiz plan)	168
Şekil 7.34.	Karot numunelerinin elde edilmesi	168
Şekil 7.35.	Yol kenar güzergahı boyunca alınan karotlar	169
Şekil 7.36.	Elde edilen karot numune boyutları	169
Şekil 7.37.	İsfalt plent şantiyesi ve soğuk hazır asfalt stokları	170
Şekil 7.38.	Hazır soğuk asfalt karışımla karot boşluklarının doldurulması	170
Şekil 7.39.	Nükleer metot deney cihazı	171
Şekil 7.40.	Normal ve SBS katkılı BSK yol kenarı sıkıştırma dereceleri yüzdesi	175
Şekil 7.41.	Normal ve SBS katkılı BSK tekerlek geçiş bölgesi sıkıştırma dereceleri yüzdesi	175
Şekil 7.42.	Tekerlek izi ölçümleri	176
Şekil 7.43.	Zamana bağlı normal ve SBS katkılı asfalt betonu kaplama tekerlek izi değişimi	178
Şekil 7.44.	Tekerlek geçiş bölgesi test çekici ölçümleri	179
Şekil 7.45.	Katkısız ve SBS katkılı asfalt betonu kaplama kenar bölgesi basınç dayanımı değişimi	183
Şekil 7.46.	Katkısız ve SBS katkılı asfalt betonu kaplama tekerlek geçiş bölgesi basınç dayanımı değişimi	184
Şekil 7.47.	2009-2010 yılı normal BSK araç trafiği	186
Şekil 7.48.	Katkısız ve SBS katkılı BSK taşıt oranları	186
Şekil 7.49.	Katkısız BSK aylık en düşük ve en yüksek sıcaklık değerleri karşılaştırması	189
Şekil 7.50.	Katkısız BSK ortalama yüzey sıcaklıkları	190
Şekil 7.51.	Katkısız BSK sıcaklık indeksleri	190
Şekil 7.52.	SBS katkılı BSK aylık en düşük ve en yüksek sıcaklık değerleri karşılaştırması	192
Şekil 7.53.	SBS katkılı BSK ortalama yüzey sıcaklıkları	193
Şekil 7.54.	SBS katkılı BSK sıcaklık indeksleri	193
Şekil 7.55.	Katkılı ve katkısız BSK ortalama yüzey sıcaklık değeri karşılaştırması	194
Şekil 7.56.	Katkılı ve katkısız BSK kümülatif yüzey sıcaklık değeri karşılaştırması	195

Şekil 7.57.	Katkısız ve SBS katkılı BSK yüzeyi 0 °C ve üzeri yıllık kümülatif gün sayısı	196
Şekil 7.58.	Katkısız ve SBS katkılı BSK yüzeyi 25 °C ve üzeri yıllık kümülatif gün sayısı	197
Şekil 7.59.	Kaplama sıcaklığının zamanla değişimi	198
Şekil 7.60.	Kaplama ve hava sıcaklık farkının zamanla değişimi	198
Şekil 7.61.	Tekerlek izi-ESDY ilişkisi	203
Şekil 7.62.	Tekerlek izi-ortalama basınç dayanımı ilişkisi	203
Şekil 7.63.	Tekerlek izi-sıkıştırma derecesi ilişkisi	204
Şekil 7.64.	Sıkıştırma derecesi-ortalama basınç dayanımı ilişkisi	205
Şekil 7.65.	Zamana bağlı hava boşluğu değişimleri	208
Şekil 7.66.	Karot numunelerine ait hava boşluk oranı değişimleri	209
Şekil 7.67.	Zamana bağlı agregalar arası boşluk değişimleri	210
Şekil 7.68.	Karot numunelerine ait agregalar arası boşluk oranı değişimleri	211
Şekil 7.69.	Zamana bağlı asfaltla dolu boşluk değişimleri	212
Şekil 7.70.	Karot numunelerine ait asfaltla dolu boşluk oranı değişimleri	213
Şekil 7.71.	Karot numuneleri Marshall stabilite değerlerinin numune tipine göre aylık değişimleri	216
Şekil 7.72.	Karot numuneleri Marshall stabilite değerlerinin aylık değişimleri ve eğilim çizgileri	217
Şekil 7.73.	Karot numuneleri Marshall akma değerlerinin numune tipine göre aylık değişimleri	218
Şekil 7.74.	Karot numuneleri Marshall akma değerlerinin aylık değişimleri ve eğilim çizgileri	219
Şekil 7.75.	Karot numuneleri Marshall oranı (MQ) değerlerinin numune tipine göre aylık değişimleri	220
Şekil 7.76.	Karot numuneleri Marshall oranı (MQ) değerlerinin aylık değişimleri ve eğilim çizgileri	221
Şekil 7.77.	Stabilite ile sıcaklık indeksi ilişkisi	222
Şekil 7.78.	Saf ve SBS katkılı laboratuvar numunelerine ait indirekt çekme dayanımı (ITS) değerleri	223
Şekil 7.79.	Karot numuneleri ITS değerlerinin numune tipine göre aylık değişimleri	226
Şekil 7.80.	Karot numuneleri ITS değerlerinin aylık değişimleri ve eğilim çizgileri	227
Şekil 7.81.	ITS ile sıcaklık indeksi ilişkisi	228
Şekil 7.82.	Saf ve SBS katkılı laboratuvar numunelerine ait indirekt çekme rijitlik modülü (ITSM) değerleri.....	230
Şekil 7.83.	Karot numuneleri ITSM değerlerinin numune tipine göre aylık değişimleri	233
Şekil 7.84.	Karot numuneleri ITSM değerlerinin aylık değişimleri ve eğilim çizgileri	234
Şekil 7.85.	Rijitlik modülü ile sıcaklık indeksi ilişkisi	236
Şekil 7.86.	Yorulma deneyi ve deney sonrasındaki numunelerin görünüşü	237
Şekil 7.87.	Laboratuarda hazırlanan numunelerin deformasyon-yük tekrar sayısı ilişkisi	238
Şekil 7.88.	Maksimum yük tekrar sayısı - asfaltit içeriği ilişkisi	239

Şekil 7.89.	Karot numunelerine ait 1. ay deformasyon-yük tekrar sayısı ilişkisi	242
Şekil 7.90.	Karot numunelerine ait 4. ay deformasyon-yük tekrar sayısı ilişkisi	242
Şekil 7.91.	Karot numunelerine ait 8. ay deformasyon-yük tekrar sayısı ilişkisi	243
Şekil 7.92.	Karot numunelerine ait 12. ay deformasyon-yük tekrar sayısı ilişkisi	243
Şekil 7.93.	Karot numuneleri yorulma deneyine ait N_{mak} değerlerinin numune tipine göre aylık değişimleri	244
Şekil 7.94.	Karot numuneleri yorulma deneyine ait N_{mak} değerlerinin aylık değişimleri ve eğilim çizgileri	245
Şekil 7.95.	Yorulma ile sıcaklık indeksi ilişkisi	247
Şekil 7.96.	Karot numunelerinin Marshall stabilitesi-indirekt çekme rijitlik modülü deney sonuçlarının karşılaştırılması	248
Şekil 7.97.	Karot numunelerinin Marshall stabilitesi-indirekt çekme dayanım deney sonuçlarının karşılaştırılması	248
Şekil 7.98.	Karot numunelerinin Marshall stabilitesi-yorulma deney sonuçlarının karşılaştırılması	249
Şekil 7.99.	Karot numunelerinin indirekt çekme rijitlik modülü-indirekt çekme dayanımı deney sonuçlarının karşılaştırılması	250
Şekil 7.100.	Karot numunelerinin indirekt çekme rijitlik modülü-indirekt çekme yorulma deneyi sonuçlarının karşılaştırılması	250
Şekil 7.101.	Karot numunelerinin indirekt çekme dayanımı-indirekt çekme yorulma deneyi sonuçlarının karşılaştırılması	251

TABLÖLER LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 2.1. Aşınma tabakası için gradasyon limitleri	27
Tablo 2.2. Binder tabakası için gradasyon limitleri	28
Tablo 2.3. Kaba agreganın fiziksel ve mekanik özellikleri	29
Tablo 2.4. İnce agreganın özellikleri	30
Tablo 2.5. Mineral fillerin gradasyon limitleri	30
Tablo 2.6. Malzemelerin karıştırma sıcaklıkları	31
Tablo 2.7. Plentten çıkan karışımın sıcaklığı	31
Tablo 2.8. Asfalt betonu serim sıcaklıkları	31
Tablo 2.9. Sıcak karışım sıkıştırma kriterleri	32
Tablo 2.10. Sıkışma ve yüzey kalınlık özellikleri	33
Tablo 2.11. Maksimum temel kalınlıkları	35
Tablo 2.12. Kaba agrega fiziksel özellikleri.....	35
Tablo 2.13. İnce agrega fiziksel özellikleri	36
Tablo 2.14. Granüler temel tabakası gradasyon limitleri	37
Tablo 2.15. Plent-miks temel tabakası gradasyon limitleri	37
Tablo 2.16. Granüler ve plent-miks temel sıkıştırma kriterleri	38
Tablo 2.17. Çimento bağlayıcı granüler temel tabakası gradasyon limitleri	39
Tablo 2.18. Bitümlü temel tabakası gradasyon limitleri	39
Tablo 2.19. Alt temel malzemesinin fiziksel özellikleri	40
Tablo 2.20. Alt temel malzemesinin gradasyon limitleri	40
Tablo 2.22. Alt temel sıkıştırma kriterleri	41
Tablo 2.21. Temel tabakaları sıkıştırma kriterleri	42
Tablo 3.1. Asfalt çimentolarının sınıflandırılması	44
Tablo 3.2. Bitümlü bağlayıcı özelliğini azaltan faktörler	48
Tablo 4.1. Düşük stabilite ve etkileri	55
Tablo 4.2. Düşük durabilite sebep ve etkileri	56
Tablo 4.3. Düşük kayma direnci sebep ve etkileri	57
Tablo 4.4. Zayıf yorulma direncinin sebep ve etkileri	58
Tablo 4.5. İşlenebilirlik problemlerinin sebep ve etkileri	59
Tablo 4.6. Karışımları geçirimli yapan sebep ve etkiler	60
Tablo 4.7. BSK'ların özelliklerine etki eden parametreler	60
Tablo 4.8. Tekerlek izi oluşum hızı ile bitümlü karışım parametreleri arasındaki korelasyon katsayısı	65
Tablo 4.9. Asfalt kaplama kusurları ve nedenleri	83
Tablo 5.1. Bitüm katkı maddelerinin genel sınıflandırılması	88
Tablo 5.2. Bitüm modifikasyon tipleri	89
Tablo 5.3. Farklı tipteki modifiyerlerin sağladıkları faydalar	89
Tablo 5.4. KGM modifiye bitüm şartname limitleri	90
Tablo 5.5. Kraton SBS ve tipleri	96
Tablo 5.6. Kraton D 1101 ve D 1192 SBS türlerinin özellikleri	96
Tablo 5.7. Türk bitümlerinin değerlendirilmesinden elde edilen sonuçlar	99
Tablo 6.1. Aşınma sayısına göre küre sayısı	106
Tablo 6.2. Granülometri sınıfları ve gerekli numune miktarı	107

Tablo 6.3.	Los Angeles agrega danesi aşınma limitleri	108
Tablo 6.4.	Yassı ve uzun danaler kriteri	109
Tablo 6.5.	Kaba ve ince agrega kırılmışlık kriterleri	110
Tablo 6.6.	Sağlamlık deneyinde uygulanan miktar	111
Tablo 6.7.	Yük ve deformasyon kontrollü yorulma deneylerinin karşılaştırılması	121
Tablo 7.1.	Bitümlü bağlayıcı deney sonuçları	143
Tablo 7.2.	BSK aşınma tabakası agrega gradasyonu	144
Tablo 7.3.	BSK aşınma tabakasında kullanılan agreganın fiziksel özellikleri ...	145
Tablo 7.4.	BSK binder tabakası agrega gradasyonu	146
Tablo 7.5.	BSK binder tabakasında kullanılan agreganın fiziksel özellikleri ...	147
Tablo 7.6.	Granüler temel tabakası elek analizi sonuçları	148
Tablo 7.7.	Granüler temel agrega fiziksel özellikleri	150
Tablo 7.8.	İnce agrega fiziksel özellikleri	150
Tablo 7.9.	Granüler temel tabakası agrega mekanik özellikleri	150
Tablo 7.10.	Katkısız BSK aşınma tabakası tip-2 dizaynı	155
Tablo 7.11.	Katkısız asfalt betonu aşınma tabakası dizayn kriterleri sonuçları	158
Tablo 7.12.	Modifiye asfalt betonu aşınma tabakası dizayn kriterleri sonuçları	161
Tablo 7.13.	Katkısız BSK binder tabakası dizaynı	162
Tablo 7.14.	Katkısız asfalt betonu binder tabakası dizayn kriterleri	165
Tablo 7.15.	Arazideki sıkıştırma tayininde 1. ay Troxler cihazı ölçüm değerleri	171
Tablo 7.16.	Arazideki sıkıştırma tayininde 4. ay Troxler cihazı ölçüm değerleri	172
Tablo 7.17.	Arazideki sıkıştırma tayininde 8. ay Troxler cihazı ölçüm değerleri	173
Tablo 7.18.	Arazideki sıkıştırma tayininde 12. ay Troxler cihazı ölçüm değerleri	174
Tablo 7.19.	BSK'larda zaman bağlı sıkıştırma dereceleri	174
Tablo 7.20.	Normal katkısız numunelerin alındığı kesimlerdeki tekerlek izi ölçümleri	177
Tablo 7.21.	SBS katkılı numunelerin alındığı kesimlerdeki tekerlek izi ölçümleri	177
Tablo 7.22.	Katkısız asfalt betonu kaplama 1. ay yüzey sertliği ölçümleri ve basınç dayanımları	179
Tablo 7.23.	Katkısız asfalt betonu kaplama 4. ay yüzey sertliği ölçümleri ve basınç dayanımları	180
Tablo 7.24.	Katkısız asfalt betonu kaplama 8. ay yüzey sertliği ölçümleri ve basınç dayanımları	180
Tablo 7.25.	Katkısız asfalt betonu kaplama 12. ay yüzey sertliği ölçümleri ve basınç dayanımları	181
Tablo 7.26.	SBS katkılı asfalt betonu kaplama 1. ay yüzey sertliği ölçümleri ve basınç dayanımları	181
Tablo 7.27.	SBS katkılı asfalt betonu kaplama 4. ay yüzey sertliği ölçümleri ve basınç dayanımları	182
Tablo 7.28.	SBS katkılı asfalt betonu kaplama 8. ay yüzey sertliği ölçümleri ve	

	basınç dayanımları	182
Tablo 7.29.	SBS katkılı asfalt betonu kaplama 12. ay yüzey sertliği ölçümleri ve basınç dayanımları	183
Tablo 7.30.	Katkısız ve SBS katkılı BSK zaman periyoduna bağlı taşıt tipi ve sayısı	
Tablo 7.31.	Katkısız ve SBS katkılı BSK aşınma tabakası sağ şerit tekerlek geçiş bölgesi toplam eşdeğer standart dingil hesabı	185
Tablo 7.32.	Katkısız BSK zaman periyotlarına bağlı sıcaklık değerleri	187
Tablo 7.33.	Normal BSK aşınma tabakası sağ şerit ortalama sıcaklık değerleri...	188
Tablo 7.34.	SBS katkılı BSK zaman periyotlarına bağlı sıcaklık değerleri	189
Tablo 7.35.	SBS katkılı BSK aşınma tabakası sağ şerit ortalama sıcaklık değerleri	191 192
Tablo 7.36.	Katkılı ve katkısız BSK ortalama sıcaklık değişimleri	194
Tablo 7.37.	Katkısız ve SBS katkılı BSK yüzey kümülatif sıcaklık değişimleri karşılaştırılması	195
Tablo 7.38.	Katkılı ve katkısız BSK yüzeyi yıllık kümülatif sıcaklık gün sayısı sayısı	196
Tablo 7.39.	Hava sıcaklık indeksi değerleri	197
Tablo 7.40.	Katkısız BSK'daki değişik hızlara sahip taşıt trafiği sayısı	200
Tablo 7.41.	Katkısız BSK aylık ortalama taşıt trafiği hızları	200
Tablo 7.42.	SBS katkılı BSK'daki değişik hızlara sahip taşıt trafiği sayısı	201
Tablo 7.43.	SBS katkılı BSK aylık ortalama taşıt trafiği hızları	201
Tablo 7.44.	Marshall deneylerinde kullanılan karot numunelerinin isimlendirilmesi	205
Tablo 7.45.	1. ay hacimsel değerler	206
Tablo 7.46.	4. ay hacimsel değerler	206
Tablo 7.47.	8. ay hacimsel değerler	207
Tablo 7.48.	12. ay hacimsel değerler	207
Tablo 7.49.	Karot numunelerinin zamana bağlı boşluk hacmi değişim fonksiyonları ve belirtme katsayıları	209
Tablo 7.50.	Karot numunelerinin zamana bağlı agregalar arası boşluk hacmi değişim fonksiyonları ve belirtme katsayıları	211
Tablo 7.51.	Karot numuneleri asfaltla dolu boşluk hacmi değişimlerine bağlı doğrusal fonksiyonlar ve belirtme katsayıları	213
Tablo 7.52.	Marshall deneylerinde kullanılan karışım numunelerinin isimlendirilmesi	214
Tablo 7.53.	Laboratuvarda hazırlanan normal ve SBS katkılı BSK kontrol numuneleri hacimsel verileri	215
Tablo 7.54.	Laboratuvarda hazırlanan katkısız numunelerin Marshall deney sonuçları	215
Tablo 7.55.	Laboratuvarda hazırlanan SBS katkılı numunelerin Marshall deney sonuçları	215
Tablo 7.56.	Karot numuneleri Marshall stabilite aylık toplam veriler	216
Tablo 7.57.	Karot numune tiplerine ait stabilite fonksiyonları ve belirtme katsayıları	217
Tablo 7.58.	Karot numuneleri Marshall akma aylık toplam veriler	218
Tablo 7.59.	Karot numune tiplerine ait akma fonksiyonları ve belirtme	

	katsayıları	219
Tablo 7.60.	Karot numunleri Marshall oranı aylık toplam veriler	220
Tablo 7.61.	Karot numune tiplerine ait MQ fonksiyonları ve belirtme katsayıları	221
Tablo 7.62.	Laboratuvarıda hazırlanan katkısız kontrol numuneleri ITS deney sonuçları	223
Tablo 7.63.	Laboratuvarıda hazırlanan katkılı kontrol numuneleri ITS deney sonuçları	223
Tablo 7.64.	Katkısız BSK yol kenar bölgesi (NK) karot numuneleri ITS deney sonuçları	224
Tablo 7.65.	Katkısız BSK tekerlek geçiş bölgesi (N) karot numuneleri ITS deney sonuçları	225
Tablo 7.66.	Katkılı BSK yol kenar bölgesi (SK) karot numuneleri ITS deney sonuçları	225
Tablo 7.67.	Katkılı BSK tekerlek geçiş bölgesi (S) karot numuneleri ITS deney sonuçları	226
Tablo 7.68.	Karot numune tipi aylık ITS deney sonucu ortalamaları	226
Tablo 7.69.	Karot numune tiplerine ait ITS fonksiyonları ve belirtme katsayıları	228
Tablo 7.70.	Laboratuvarıda hazırlanan katkısız kontrol numuneleri ITSM deney sonuçları	230
Tablo 7.71.	Laboratuvarıda hazırlanan SBS katkılı kontrol numuneleri ITSM deney sonuçları	230
Tablo 7.72.	Katkısız BSK yol kenar bölgesi (NK) karot numuneleri ITSM deney sonuçları	231
Tablo 7.73.	Katkısız BSK tekerlek geçiş bölgesi (N) karot numuneleri ITSM deney sonuçları	232
Tablo 7.74.	Katkılı BSK yol kenar bölgesi (SK) karot numuneleri ITSM deney sonuçları	232
Tablo 7.75.	Katkılı BSK tekerlek geçiş bölgesi (S) karot numuneleri ITSM deney sonuçları	232
Tablo 7.76.	Karot numune tipi aylık ITSM deney sonucu ortalamaları	233
Tablo 7.77.	Karot numune tiplerine ait ITSM fonksiyonları ve belirtme katsayıları	235
Tablo 7.78.	Laboratuvarıda hazırlanan numunelerin 300 kPa gerilme seviyesinde indirekt çekme yorulma deney sonuçları	238
Tablo 7.79.	Katkısız BSK yol kenar bölgesi (NK) karot numuneleri yorulma deney sonuçları	240
Tablo 7.80.	Katkısız BSK tekerlek geçiş bölgesi (N) karot numuneleri yorulma deney sonuçları	240
Tablo 7.81.	Katkılı BSK yol kenar bölgesi (SK) karot numuneleri yorulma deney sonuçları	241
Tablo 7.82.	Katkılı BSK tekerlek geçiş bölgesi (S) karot numuneleri yorulma deney sonuçları	241
Tablo 7.83.	Karot numune tiplerine ait yorulma deneyi fonksiyonları ve belirtme katsayıları	246
Tablo 7.84.	Karot numuneleri denklem takımı ve belirtme katsayıları	251

SEMBOLLER LİSTESİ

A	: Numunenin kesit alanı
C	: Düzeltme faktörü
DP	: Filler oranı
d	: Kalıbın çapı
E_c	: Sünme modülü
E_r	: Rezilyans modülü
F	: İndirekt çekme rijitlik modülü deneyinde maksimum dikey yük
f_{ck}	: Asfalt betonu kaplamaların basınç mukavemeti
G	: Numunenin başlangıç yüksekliği
G_{mb}(ölçülen)	: Sıkışmış numunenin ölçülen hacim özgül ağırlığı
G_{mb}(tahmini)	: Sıkışmış numunenin hesaplanan tahmini hacim özgül ağırlığı
G_{mb}(düz.)	: Herhangi bir yoğurma için düzeltilmiş hacim özgül ağırlığı
G_{mm}	: Asfalt karışımının maksimum özgül ağırlığı
G_{mb}	: Sıkıştırılmış karışımın hacim özgül ağırlığı
G_b	: Bağlayıcının özgül ağırlığı
G₁, G₂, G_N	: Her bir agreg a grubunun hacim ve zahiri özgül ağırlığı
G_{se}	: Agreg a karışımının efektif özgül ağırlığı
G*	: Kompleks kayma modülü
h_x	: Sıkıştırma esnasında numunenin yüksekliği
H	: 5 yük tekrarı sonucunda oluşan ortalama yatay deformasyon
h	: Numune yüksekliği
I	: Hava boşluğu hacmi
k₁ ve k₂	: Malzeme karakteristikleri
L	: Ortalama numune yüksekliği
L₁	: LVDT'nin başlangıç referans deplasmanı
L_{2n}	: n darbe sayısındaki maksimum deplasman
L_{3n}	: (n+1). darbe uygulanmadan önceki deplasman
MaxD_p(a/c)	: Maksimum özgül ağırlıktaki bitüm yüzdesi
MaxS(a/c)	: Maksimum stabilitedeki bitüm yüzdesi
N_f	: Yorulma ömrü
n	: Örnekteki toplam gözlem sayısı
N_i, N_f, N_{mak}	: Çatlak başlangıcı, yorulma ömrü ve maksimum yük tekrar sayıları
Opt.a/c	: Optimum bitüm yüzdesi
Ort.V_h(a/c)	: Şartname kriterlerine göre hava boşluğu ortalamasındaki bitüm yüzdesi
Ort.V_f(a/c)	: Şartname kriterlerine göre asfaltla dolu boşluk ortalamasındaki bitüm yüzdesi
P₁, P₂, P_N	: Her bir agreg a grubunun ağırlıkça yüzdesi
P_b	: Bağlayıcı yüzdesi
P_s	: Agreg a yüzdesi
P_{bi}	: Karışım ağırlığına göre bağlayıcı yüzdesi
P_{0,075}	: Karışım da kullanılan 0,075 mm'lik (No. 200) elekten geçen filler malzemesinin agreg a karışımındaki ağırlıkça yüzdesi
P_{mak}	: Kırılmaya neden olan maksimum yük
P₂₅	: Bitümün 25 ⁰ C'deki penetrasyon değeri

R	: Poisson oranı
R²	: Belirleme katsayısı
S_n	: Agregada karışımındaki nominal maksimum elek boyutu
S_m	: İndirekt çekme rijitlik modülü
S'	: Doygunluk derecesi
T_{YN}	: Yumuşama noktası
TS_{yaş}	: Koşullandırılmış numunelerin çekme dayanımı değeri
TS_{kuru}	: Koşullandırılmamış numunelerin çekme dayanımı değeri
TS	: Çekme dayanımı
U	: Maksimum yük-deformasyon eğrisi altında kalan alan
V	: Numune hacmi
V_a	: Hava boşluğu hacmi
V_{be}	: Efektif bağlayıcı hacmi
V_{ba}	: Absorbe edilen asfalt bağlayıcı hacmi
VMA	: Absorbe edilen asfalt bağlayıcı hacmi
VFA	: Asfaltla dolu mineral agregadaki boşluk yüzdesi
V_{mx}	: Numunenin hesapla bulunan hacmi
W_s	: Agreganın ağırlığı
W_b	: Toplam agregada ağırlığına göre alınacak bağlayıcı miktarı
W_m	: Numunenin ağırlığı
ΔW	: Maksimum düşey deformasyon
x_{ort}	: Örnekteki toplam gözlem sayısının aritmetik ortalaması
σ	: Standart sapma
ε_t	: Direkt çekme deneyinde uzama miktarı
ε_{mak}	: Maksimum birim şekil değiştirme
ε_c	: Toplam plastik eksenel birim şekil değiştirme
ε_r	: Toplam elastik eksenel birim şekil değiştirme
δ_i, δ_f, δ_{mak}	: Çatlak başlangıcı, yorulma ömrü ve maksimum yük tekrar sayılarındaki deformasyon miktarları
τ	: Kayma gerilmesi
δ	: Faz açısı
γ_{su}	: Suyun yoğunluğu

KISALTMALAR

AASHTO	: American Association of State Highway and Transportation Officials (Amerikan Devlet Karayolu ve Ulaştırma Birliği)
ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
AC	: Asfalt Çimentosu
ASTM	: American Society for Testing and Materials (Amerikan Test ve Malzeme Standartı)
BBR	: Bending Beam Rheometer (Kiriş Eğme Reometresi)
BSK	: Bitümlü Sıcak Karışım
CR30	: Antioksidan
CRRI	: Karayolu Araştırma Programı
CMCRA	: Atık Lastikle Modifiye Edilmiş Asfalt
DDT	: Direct Tensile Tester (Doğrudan Çekme Deneyi)
DPT	: Devlet Planlama Teşkilatı
DSR	: Dynamic Shear Rheometer (Dinamik Kayma Reometresi)
DMA	: Dinamik Mekanik analizler
ESDYS	: Eşdeğer standart dingil yükü sayısı
ETDY	: Eşdeğer Standart Tek Dingil Yüğü
ETDYS	: Tekerlek İzi Oluşum Hızı
EVA	: Etilen Vinil Asetat
HDM	: Karayolu veri yönetim yazılım programı
HDPE	: Taşlanmış Yüksek Yoğunluklu Polietilen Modifiyeler
HMA	: Hot Mix Asphalt (Sıcak Asfalt Karışım)
İÇYD	: İndirekt Çekme Yorulma Deneyi
IDT	: İndirekt Çekme Gerilmesi
IR	: İnfrared Spektroskopy
ITS	: Indirect Tensile Shear (İndirekt Çekme Gerilmesi)
ITSM	: Indirect Tensile Stiffness Modulus (İndirekt Çekme Rijitlik Modülü)
İBB	: İstanbul Büyükşehir Belediyesi
K	: Katkısız Temin Edilen Bitümlü Sıcak Karışım Numuneler
KK	: SBS Katkılı Temin Edilen Bitümlü Sıcak Karışım Numuneler
KGM	: Karayolları Genel Müdürlüğü
KTŞ	: Karayolları Teknik Şartnamesi
LDPE	: Düşük Yoğunluklu Polietilen
LVDT	: Linear Variable Differential Transformer (Doğrusal Değişken Türevsel Dönüştürücü)
MD	: Rezidans Modülü
MQ	: Marshall Quotient (Marshall Oranı)
Mw	: Ortalama Moleküler Ağırlık
MTA	: Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü
N	: Katkısız Tekerlek Geçiş Bölgesi Karot Numuneleri
Na2SO4	: Sodyum Sülfat
NK	: Katkısız Yol Kenarı Park Alanı Karot Numuneleri
PAV	: Pressure Aging Vessel (Basıncılı Yaşlandırma Aleti)
PG	: Performance Grade (Performans Sınıfı)

PI	: Penetrasyon İndeksi
PMA	: Polimer Modifiyeli Sıcak Karışımlar
PMAM	: Polimer Modifiyeli Asfalt Betonu Karışımlar
PTS	: Penetrasyon Sıcaklığı Hassasiyeti
QTT (NC 200)	: NC 200 Trafik Analiz Cihazı
RTFOT	: Rolling Thin Film Oven Test (Dönel İnce Film Halinde Isıtma Deneyi)
RV	: Rotational Viscometer (Dönel Vizkozimetre)
S	: SBS Katkılı Tekerlek Geçiş Bölgesi Karot Numuneleri
SBS	: Stiren-Butadien-Stiren Polimerler
SBR	: Stiren-Butadien Kauçuk
SBS-g-M	: Vinil Monomer Aşılı Stiren-Butadien-Stiren Polimerler
SGC	: Superpave Gyrotory Compactor (Superpave Yoğurmalı Sıkıştırıcı)
SHRP	: Strategic Highway Research Program (Stratejik Karayolu Araştırma Programı)
SK	: SBS Katkılı Yol Kenarı Park Alanı Karot Numuneleri
SUPERPAVE	: Superior Performing Asphalt Pavement (Yüksek Performanslı Asfalt Kaplama)
TSE	: Türk Standartları Enstitüsü
TSR	: Çekme Dayanımı Oranı
TOKİ	: Başbakanlık Toplu Konut İdaresi
TÜBİTAK	: Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu
TÜPRAŞ	: Türkiye Petrol Rafinerileri Anonim Şirketi
UCO	: Silindir Yağı
UMATTA	: Universal Material Testing Apparatus (Üniversal Malzeme Deney Aleti)
VA	: Vinil Asetat
WMA	: Ilık Asfalt Karışımlar
VMI	: Araç Manyetik Görüntü Çipi
YOGT	: Yıllık ortalama günlük trafik

1. GİRİŞ

1.1. Genel Bilgiler

Geçmişten günümüze insanlar, çeşitli ihtiyaçlarını karşılamak için farklı ulaşım yöntemlerinden faydalanmışlardır. Bu kapsamda, şehirler ve ülkeler arasındaki bağlantıları sağlayan, yol ve ticaret hacmini arttırmada birçok araç kullanılmış, bu durum beraberinde çeşitli yol ağlarının da gelişmesine yol açmıştır. Ulaşım çeşitleri bakımından raylı sistemler kullanılmış daha sonraki dönemlerde ise yük ve yolcu taşımacılığı bakımından taşıt gelişimine bağlı olarak karayolu ile ulaşım ihtiyaçları karşılanmıştır.

Dünya genelinde bazı şehirler coğrafi ve jeopolitik bakımından stratejik noktalar üzerinde yer aldığından, bu şehirlerin önemleri bir kat daha artmıştır. Bu gibi özelliklere sahip yerleşimler, yolcu ve yük taşımacılığı olarak ticaretin yoğun olduğu cazibe merkezleri haline gelmiştir. Türkiye'nin konum itibarıyla ticari ve turizm bakımından Asya ile Avrupa arasında köprü görevi görmesi, nüfusu ve sanayisi bakımından şehirler arasında İstanbul'u ön plana çıkartmıştır.

Türkiye'de hem yük hem de yolcu taşımacılığının önemli oranda karayolları taşımacılığı kullanılarak karşılandığı görülmektedir. Türkiye İstatistik Kurumu'nun (TÜİK) verilerine göre; 2000 yılında 8 milyon 320 bin 449 olan motorlu kara taşıt sayısı, aradan geçen süre içinde %119.8 oranında artarak, 2014 Mayıs ayı sonu itibarıyla 18 milyon 288 bin 137'ye çıkmıştır. Mayıs 2014 itibarıyla sadece İstanbul'da 3 milyon 284 bin 483, Ankara'da da 1 milyon 534 bin 555 adet motorlu taşıt bulunmaktadır. 18 milyon 288 bin 137 adet motorlu kara taşıtı içinde %17.9 pay ve 3 milyon 284 bin 483 araç ile İstanbul ilk sırada yer almıştır. Toplam 9 milyon 514 bin 881 adet otomobilin de 2 milyon 191 bin 106'sı İstanbul plakalı araçlardan oluşmaktadır. Bir başka ifadeyle Türkiye'de kayıtlı bulunan her dört araçtan biri İstanbul plakalı araçları kapsamaktadır. Bu durum 17 milyon nüfuslu İstanbul'u metropoliten bir kent konumuna getirmiştir. Bu nedenle artan taşıt trafiğini karşılamak ve kapasite artışına cevap vermek için yol ağlarının geliştirilmesi önem arz etmektedir. İstanbul taşıt trafiğinde son yıllarda hafif raylı sistem, tramvay ve metro tipi toplu ulaşımlarda ilerlemelere rağmen, yolcu ve yük taşımacılığında genellikle karayolu ulaşımı tercih edilmektedir. Karayolu üst yapılarında da en çok esnek üst yapı kullanılmaktadır. Bu kadar yaygın bir şekilde kullanılan esnek üst yapılarda ekonomik,

sağlam, konforlu, güvenli ve uzun ömürlü hizmeti sağlamak için bazı kriterlerin yerine getirilmesi gerekmektedir. Esnek üst yapılardan performans bakımından istenilen verimi almak için kullanılacak malzemenin tipi, miktarı, dizayn özellikleri, arazi koşulları, çevre ve iklim koşulları ile kaplamanın uygulama biçimi uzun yıllar hizmet vermesi bakımından önemlidir.

Bitümlü sıcak karışımlar (BSK) laboratuvarlarda dizayn edildikten sonra elde edilen bu malzeme karışımı plentte hazırlanıp, arazide uygulandıklarında, çevre ve iklim koşullarına bağlı değişiklik gösterebilmekte dolayısıyla trafik etkisi altında zamanla birtakım kusurlara neden olabilmektedir. Ayrıca esnek yol kaplamaları, dingil yükü ve taşıt miktarlarına bağlı olarak dizayn edilmekte olup, bazen taşıtların dingil yükleri ve miktarları değişebilmekte, yollarda tekerlek izinde artış ve yorulma direncinde azalma gibi kaplamada bozulmalara neden olabilmektedir. Motorlu taşıt sayısındaki ve dingil yüklerindeki artışlara bağlı olarak yollarda bozulma etkileri de artmaktadır. Bu durum, yolların hem dayanımlarının hem de ekonomik açıdan performanslarının artırılması için modifiye bitüm kullanımını gerektirmektedir.

1.2. Araştırmanın Amacı ve Kapsam

Gerçekleştirilen çalışmanın amacı, modifiyeli ve normal olarak serilip sıkıştırılmış BSK'nın mekanik özelliklerinin trafik yükleri ve çevre koşulları altında uzun sürede nasıl değişeceğini tespit etmek, modifiyeli ve normal karışımların arazi performanslarını karşılaştırmaktır.

Çalışma kapsamında plentte hazırlanmış normal ve SBS modifiyeli BSK'lar aynı güzergah üzerinde finişerlerle serilip silindirlerle sıkıştırılarak, trafiğe açılan yolun başlangıç ve sonraki 12 aylık periyot zarfındaki arazi ve laboratuvar deneysel çalışmaları yapılmıştır. Arazi deneylerinde; tekerlek izi oluşumları, troxler cihazıyla sıkıştırma derecesi ve test çekiciyle asfalt dayanımının ölçümü yapılmış ayrıca mobil zemin sensörü kullanılarak yoldan 12 ay boyunca geçecek taşıtların sayısı, cinsi ve kaplama yüzey sıcaklığı belirlenmiştir. Arazi çalışmaları ve 3 aylık periyotlar halinde alınan karot numunelerinin fiziksel ve mekanik özellikleri belirlenerek trafik, iklim gibi çevre koşullarının farklı tip (katkılı ve katkısız) asfalt kaplamalar üzerindeki etkileri incelenmiştir.

1.3. Araştırmanın Önemi

Kaplamaların performans bakımından istenilen verimi sağlaması için kullanılacak malzemenin türü, miktarı, dizayn özellikleri, arazi koşulları, trafik, çevre ve iklim koşulları ile kaplamanın uygulama biçimi, yol üst yapısını oluşturan tabakaların özellikleri uzun yıllar hizmet vermesi bakımından önemlidir.

Laboratuvar ortamında dizayn edilen BSK'lar, plentte hazırlanıp arazide uygulandıklarında trafik yükü ve iklim gibi çevre koşullarından etkilenmektedir. Bu durum, BSK ile hazırlanan yol üst yapısı kaplama tabakasında daha sonra oluşabilecek bir takım kusurlara yol açabilmektedir. Ayrıca esnek yol kaplamaları performans dayalı olarak trafik ve iklim şartları dikkate alınarak dizayn edilmektedir. BSK'larla hazırlanan yolları kullanan taşıtların bazen dingil sayıları ve yükleri değişebilmekte, dolayısıyla tekerlek izi oluşması ve yorulma direncinde azalma gibi kaplama tabakasında bozulmalara yol açmaktadır. Bunun sonucunda, motorlu taşıt sayısındaki artışlara bağlı olarak yollarda bozulma etkileri de artmaktadır. Bu nedenle, yolların dayanımlarının artırılmasına yönelik modifiye bitümlü karışımların kullanım ihtiyacı doğmuştur.

Bu tez çalışması kapsamında, normal ve SBS modifiyeli BSK'lar, aynı trafik ve çevre şartlarında belirli bir güzergah üzerinde uygulanmıştır. Çevre, iklim ve taşıt sayılarının etkilerinin yol kaplaması üzerindeki bir yıllık süre zarfındaki arazi ve laboratuvar performansları, cihazlar vasıtasıyla ölçülerek karşılaştırılmış, kullanılan malzeme ve uygulama sonuçlarının değerlendirilmesi yapılmıştır.

Bir yıllık periyotta yapılan laboratuvar ve arazi uygulamalarından elde edilen sonuçlar ışığında, çevre ve trafik etkilerinin BSK'ların performansına etkileri değerlendirilecektir. Bu çalışmada, normal ve modifiye bitümlü karışımların davranışlarının arazi şartlarında ve trafik etkisi altında elde edilecek sonuçlardan ortaya çıkabilecek dizayn, iklim ve çevre problemleri gibi olumsuzluklara karşı önceden alınabilecek tedbirler bakımından yapılacak çalışmalara ışık tutacağı düşünülmüştür.

1.4. Araştırma Materyali ve Metod

Bu çalışmada, İstanbul şehir içi yolcu trafiğinde Küçükçekmece İlçesi sınırları içerisinde yer alan bir bölgede, yeni yapılacak yol güzergahı üzerindeki esnek yol kaplaması baz alınmıştır. Uygulama alanında aynı güzergah üzerinde ve aynı trafik yükü

altındaki SBS modifiyeli ve katkısız BSK ile hazırlanan asfalt betonu kaplamasının özellikleri karşılaştırılmıştır. Kullanılan BSK'nın fiziksel ve mekanik özelliklerini tespit etmek için bir takım arazi ve laboratuvar deneyleri yapılmıştır. Karışımın laboratuvarda yeni yapılacak yola uygulamadan önceki dizayn özellikleri ile daha sonra uygulama sırasında plentte hazırlanıp yola uygulanan karışımdan alınan BSK numunelerinin özellikleri tespit edilerek laboratuvar ve arazi uygulamasındaki malzeme özellikleri karşılaştırılmıştır.

BSK'lara yönelik yapılacak deneysel çalışmalarla ilgili ilk olarak, modifiyeli ve modifiyesiz karışımların elde edildiği plentten sıkıştırılmamış BSK'lar temin edilmiş ve laboratuvarda optimum bitüm oranı ve agrega gradasyonu tespiti yapılmıştır. Ayrıca modifiyeli ve modifiyesiz BSK için Marshall tokmağıyla sıkıştırma yapılarak 9'ar adet olmak üzere toplam 18 adet Marshall briketi, deneysel çalışmalarda kullanılmak üzere elde edilmiştir. Finişerlerle serilen BSK sıkıştırıldıktan iki gün sonra; iki şeritli yolun kenarından ve taşıtların tekerleklerinin geçtiği yola ait kısımlardan 1. ay, 4. ay, 8. ay ve 12. ay da olmak üzere toplam 72 adet karot numunesi alınarak, değişik periyotlardaki trafik yükü ve çevresel etkiler altındaki modifiyeli ve modifiyesiz numunelerin fiziksel ve mekanik özellikleri tespit edilip, karşılaştırması yapılmıştır. Bu dönemlerde ayrıca arazi deneyi olarak; tekerlek izi oluşumları, arazide deney aleti vasıtasıyla ölçülmüş, asfaltın darbelere karşı dayanımı için beton test çekici ve asfalt kaplamanın sıkıştırma derecesi için de Troxler nükleer yoğunluk ölçüm cihazı kullanılmıştır. Ayrıca esnek yol kaplamasına yerleştirilen taşınabilir trafik analiz ünitesi olan mobil zemin sensörü ile araç sayımı, araç tipi ve kaplama yüzey sıcaklığı gibi genel özellikler aylık periyotlar halinde 12 ay boyunca tespit edilmiştir. Elde edilen karot numunelerinin laboratuvar ortamında Marshall stabiliteleri, indirekt çekme rijitlik modülleri, tekrarlı yorulma ömürleri ve neme karşı hassasiyetleri tespit edilmiş, çevre ve trafik koşulları ile malzemenin özelliklerine bağlı 2 farklı tip BSK yol uygulamasının gerçek koşullarda özelliklerinin karşılaştırması yapılmıştır.

1.5. İlgili Literatür Bakımından Çalışmanın Yeri

Bitüm modifikasyonu, düşük sıcaklıklarda daha elastik, yüksek sıcaklıklarda daha rijit karışımlar elde etmek, kayma direnci yüksek kaplama yüzeyleri elde etmek, karışımların

mukavemet ve stabilitesini arttırmak, karışımların yorulma direncini arttırmak, düşük kaliteli agregaları kullanabilir hale getirmek gibi amaçları taşımaktadır [1].

Bağlayıcıların performansını artırıp uzun süreli olarak korumak, hizmet ömrünü artırmak için eski zamanlardan günümüze kadar modifiyer denilen çeşitli katkı maddeleri kullanılmıştır. Bitümün ve BSK'ların trafik yüklerine ve ısıya karşı dayanımlarını arttırmak amacıyla genellikle bitüme, polimer kökenli katkı maddeleri ilave edilmektedir. Bu katkı maddeleri içerisinde en çok Stiren-Butadien-Stiren (SBS) Blok Kopolimerleri kullanılmaktadır. Yapılan birçok çalışma sonucunda SBS'nin karışımın düşük sıcaklıklarda çatlama, yüksek sıcaklıklarda tekerlek izi oluşumu ve yorulmaya karşı dayanımı arttırdığı belirlenmiştir [2-6].

Çin'de istatistik verilere göre, üretilmiş ve her yıl %12'lik büyüme oranı ile terk edilen toplam hurda lastik sayısı 2002'de 80 milyon, 2005'te 120 milyon, 2010'da 200 milyona ulaşmıştır. Weidong yaptığı araştırmada, atık lastik çevre kirliliğini azaltmak ve asfalt karışım özelliklerini geliştirmede lastik kauçuk modifiye asfalt kullanmıştır. Asfalt karışımlarda lastik kauçuk kullanılmasının, yüksek sıcaklık sürekli deformasyon ve düşük sıcaklık çatlama direnci performansını geliştirmede önemli etkisi bulunmuştur [7].

Kuloğlu ve ekibi çalışmalarında, çeşitli katkı malzemelerinin BSK'larda modifiyer olarak kullanılmasını değerlendirmiştir. Genel olarak BSK'larda SBS katkı kullanılmasının, yapılan deneysel çalışmaların sonucunda, performans özellikleri bakımından daha iyi sonuç verdiği görülmüştür [8].

Atık lastik kirliliğini azaltmak ve asfalt karışım özelliklerini geliştirmek için yeniden işlemden geçirilen lastik kauçuklar, kuru yöntem kullanılarak laboratuvar ortamında modifiye asfalt karışım olarak çalışılmış, asfalt karışımların mühendislik özellikleri gelişmiş ve yüksek sıcaklık ile düşük sıcaklık çatlaklarında sürekli deformasyon dirençlerinin performansları üzerinde önemli etkilere sahip olduğu görülmüştür [9]. McDonald, Overflex diye adlandırılan parçalanmış kauçuk ilavesi ile modifiye asfalt bağlayıcıların özellikleri geliştirilmiştir [10].

Kauçuk modifikasyonunun yoğun ve boşluklu gradasyonlu karışımların fiziksel özellikleri üzerindeki etkileri, Sarsam tarafından alışılmış sıkıştırma tokmağı kullanılarak çalışılmıştır. Kauçuk modifiyeli asfalt betonlarının davranışlarının gradasyona etkileri ise Takkalou tarafından çalışılmıştır. Silindir ile yapılan sıkıştırmada, yoğun gradasyonlu karışımların boşluklu gradasyonlu karışımlara göre daha büyük stabilite ve gerilme mukavemeti ile daha düşük akma değerine sahip olduğu, sıkıştırma cihazıyla yapılan

sıkıştırırmada ise boşluklu gradasyonlu karışımların yoğun gradasyonlu karışımlara göre daha büyük Marshall stabilitesi elde edilmiştir [11,12].

Hussain ve arkadaşlarının yaptığı çalışmalarda atyoğun aktif poli propilen (APP) 5 farklı içerikteki (%3'ten %7'ye kadar asfalt ağırlığı içeriğinde) hem tek hem de kauçuk (stiren-butadien kauçuk (SBR), katmanlı lastik ile eşit parçalı SBR ve %60-70 penetrasyon derecesindeki yerel modifiye asfaltlar olarak kullanmıştır. Modifiyeli ve modifiyesiz asfaltların özellikleri (yumuşama noktası, penetrasyon değerleri ve penetrasyon sıcaklığı hassasiyeti (PTS), penetrasyon indeksi (PI), dinamik viskozite ve çekme gerilmesi) incelenmiştir.

Modifiyeli ve modifiyesiz asfalt karışımların durabilitesi, Marshall ve tekerlek izi testi yoluyla tespit edilmiştir. Test sonuçları, asfalt bağlayıcı ve asfalt karışımların temel bütün özelliklerinde modifiye ilavesi ile iyileşmelerin olduğunu göstermiştir. İyileştirme derecesinin polimer ve bitüm/polimer oranı özelliklerine bağlı olduğu görülmüştür [13].

Reoloji, kaplamada bitüm performansını değerlendirmede yararlı bir araç olmuştur. Mohammed ve ekibi, antioksidan (CR30) ile ufalanmış kauçuklu modifiye bitümlerin visko elastik özelliklerini reolojik ölçümler ile tespit etmiştir. Dinamik kayma reometresi (DSR) yaşlanmadan önceki ve sonraki dönemde bağlayıcıların reolojik sınıflandırılmasında kullanılmıştır. Yaşlanma sonucunda bitümün reolojisinde kompleks modülü artması ve faz açısının azalması şeklinde etkilerin olduğu belirlenmiştir [14].

Deniz ve arkadaşları, kullanılmış otomobil lastiklerinin BSK'lara etkisini araştırmış ve granür hale getirilen lastiklerin BSK'lara katılmasıyla kalıcı deformasyonlara karşı soğuk iklimlerin hakim olduğu bölgelerde olumlu etki yapacağı görülmüştür [15].

Laboratuvar ortamında yapılan bir çalışmada iki karışım tipindeki kauçuk modifiye asfalt, çeşitli sıcaklık ve basınç durumlarında rezonant kolon testlerine tabi tutularak sonuçları sunulmuştur. Kauçuk modifiye asfalt karışımlar, %20 kauçuk içeriğinde ve %10 kauçuk içeriğinde test edilmiştir. Sonuçların geleneksel asfaltlar ile karşılaştırılması amaçlanmıştır. Bu üç deney numuneleri, çeşitli sıcaklık ve basınç durumlarında beklenen çevresel yükleme oranı, çeşitli yüksek hız demiryolu temellerindeki simule edilerek kesme modülü ve sönüm oranları rezonant kolon cihazları ile test edilmiştir. Kauçuk içerikli asfalt karışımlarda kesme modülü ve sönümleme oranının arttığı görülmüştür. İlave olarak kesme modülü ve sönüm oranları ile sıcaklık değişimi arasında güçlü bir bağ bulunmuştur [16].

Navarro ve ekibi 2004 yılında yapmış oldukları araştırmada, %9 oranında atık lastik kauçuk ilaveli modifiye bitümlerin hizmet ömür ve sıcaklık kullanımındaki (pompalama,

kariştırma, sıkıştırma vs.) termo reolojik davranışlarını ele almışlardır. Atık lastiklerin modifiye bitüm olarak kullanımı, lastiklerin hurda olarak atılmasıyla türeyen çevre kirlilik problemini hafifletmiştir. Atık kauçuk lastik katkıli modifiye bitümler, yüksek hizmet sıcaklıklarında hem kompleks modülünü hem de viskoziteyi arttırmıştır ve düşük sıcaklıklarda depolama ve kayıp modülleri azaltmıştır. Sonuç olarak bu sıcaklık bölgelerinde daha esnek bağlayıcı elde edilmiştir. Lastik kauçuk kırıntılı modifiye bitüm görüntüleri hem tekerlek izi hem de yorulma çatlağı direncini geliştirip, mekanik özelliklerini arttırmıştır [17].

Hernandez ve ekibi tarafından lastik kauçuğı ilaveli modifiye edilmiş sıcak karişım asfaltı irdelenmiştir. Araştırma, kısmen laboratuvarıda (optimum karişım kompozisyonu) ve arazide yürütölmüş, İspanya’da yer alan Salamanca ve Ciudad Rodrigo arasındaki bölgede ikincil trafik yolunda, 2,5 km uzunluğunda deneysel yol segmenti inşa edilerek, asfalt betonu kaplamaların mekanik özellikleri incelenmiştir. Modifiye edilmiş sıcak karişımlarla hazırlanan asfalt betonu kaplamaların mekanik özelliklerinde gelişmeler sağılanmıştır [18].

Çelik yaptığı araştırmada, atık lastikle modifiye edilmiş bitümün ve bu bitümle hazırlanan asfalt betonunun yorulma davranışını incelemiştir. Bitümün otomobil lastiğıyle modifikasyonu, asfalt betonunun yorulma süresini önemli ölçüde arttırmıştır. %5 oranında kauçuk kullanımı 50 penetrasyonlu bitümde yorulma ömrünü 2 kat, 100 penetrasyonluda ise 23 kat arttırdığı gözlenmiştir [19].

Sibal vd., atık kauçukların agregalara ilave edilmesiyle hazırlanan modifiye edilmiş asfalt betonunun yorulma davranışını araştırmıştır. Saf ve kauçuk modifiyeli asfalt betonundaki yorulma testleri 20°C, 25°C ve 30°C sıcaklıklarda sabit gerilme modlarında yapmışlardır. Kauçuk modifiyeli asfalt betonları, normal asfalt betonuna göre önemli bir şekilde daha büyük yorulma ömürlerine sahip olmuştur. Kauçuk modifiyeli asfalt betonları ile hazırlanan kaplamalarda daha düşük dizayn kalınlığı elde edilmiştir [20].

Thompson 1964’de yaptığı deneysel çalışmalarda, yollarda yüzey malzemesi olarak kullanılan kauçukların ve %4 kauçuk ilavesinin kırılma şiddetinde önemli ölçüde azalmalara yol açtığını, agregalar arasındaki ilk bağ güçleri arasında artışların olduğunu, ayrıca sıcak havadaki ağır trafik koşullarında, bitüm erimesi eğiliminde azalmaların göröldüğünü tespit etmiştir [21].

Bathune, araştırmasında, atık kauçuk modifiyeli agregaların trafik etkisinde daha büyük direnç, yüzey direncinde ilerleme, daha az parlaklık, ve daha az trafik gürültüsü elde etmiştir [22].

Karayolu Araştırma Programı (CRRI) tarafından Yeni Delhi’de yapılan deneylerde, atık kauçuk ile üretilmiş modifiye bitümlü karışımların termal çatlak, tekerlek izi, nem hasarları ve yaşlanma sertleşmesi dirençlerinde gelişmeler sağlanmıştır [23].

Lee ve Amirkhanian ise çalışmalarında, sıkıştırma koşullarının bir fonksiyonu olarak kauçuk modifiyeli asfalt karışımların hacimsel ve tekerlek izi özellikleri üzerinde laboratuvar araştırması yürütmüşlerdir. Geleneksel, kauçuk ve SBS modifiyeli bağlayıcı ile superpave karışım tasarımı yapılarak optimum bitüm oranı tespit edilmiştir. Sonuç olarak, sıkıştırma sıcaklıklarının kontrol ve SBS modifiyeli karışımlardan farklı olarak kauçuk modifiyeli karışımların hacimsel özelliklerini önemli ölçüde etkilediğini göstermiştir. Genel olarak karışımların hava boşluğu içeriği sıkıştırma seviyelerinden etkilenmiştir. Daha yüksek hava boşluk oranına sahip kauçuk modifiyeli karışımların tekerlek izi direncinde olumsuz etkilere yol açtığı görülmüştür [24].

Mull ve diğerleri tarafından, kimyasal olarak atık lastikle modifiye edilmiş asfaltların (CMCRA), kırılma direnci J-integral konseptine dayalı olarak değerlendirilmiştir. Elektron mikroskopik muayene tanımlamasının yapıldığı her bir karışım yüzeyindeki mikro yapı kökenlerinde, CMCRA kaplamalar kontrol numuneleri ile karşılaştırıldığında, kırılma dirençlerinde gelişmeler ortaya çıkmıştır [25].

Son yıllarda yolların yapısı; trafik yoğunluğunun artması, tekerlek yükü ve lastik basıncı artışı ile bakım derecesindeki yetersizlikten ötürü beklenilenden daha hızlı bir şekilde tahribata yol açmıştır. Tahribatı azaltmak ve bu bakımdan esnek kaplamaların uzun süreli durabilitesini arttırmak, bitüm tabakalarının sürekli deformasyon direnci, düşük sıcaklık çatlamaları, yükleme bağlantılı yorulma, aşınma, soyulma ve yaşlanma gibi performansla ilgili özelliklerinin geliştirilmesi gerekmektedir. Esnek malzeme tabakalarının kalitesini arttırmanın bir yolu, yüksek kaliteli bitüm kullanmaktır. Bunun yanında köprüler, pistler ve büyük trafik yüklü yüzeylerde özel bağlayıcılar, bazı uygulamalar için acilen gerekmektedir. Bu örnekler bitümlü modifikasyonlar için potansiyel alanlarda tavsiye edilmektedir. Bitüm modifikasyonunda SBS kopolimerlerin kullanılması, 1960 yılında Shell Kimya Şirketi tarafından geliştirilmiştir. Yapılan birçok araştırmadan sonra polimer modifiyeli bitüm (PMBs) yapılmıştır. Araştırma çabalarına rağmen PMBs doğal bitümün karışıklığı, bitüm ve polimer arasındaki etkileşim

karışıklığından ötürü belirli bir şekilde henüz sınıflandırılmamıştır. Bitümlü bağlayıcıların reolojik özellikleri SBS ile gelişmiştir [26-36].

Farklı tip katkıların ilave edilmesiyle bitümler modifiye edilmektedir. Bitümlerde katkı olarak kullanılan malzemelerden biri de polimerlerdir. Modifiye bitümlerde kullanılan polimerler; plastomerler ve elastomerler olarak sınıflandırılır. Plastomerler etilen vinil asetat, stabilite ve stabilize olmayan polietilen ve çeşitli polipropilene dayalı bileşimler içerirler. Bitüme polimer ilave edilmesi bitümün rijitliğini artırıp, sıcaklık hassasiyetini geliştirmektedir. Rijitliğin artması, sıcak iklimlerde karışımların tekerlek izi direncini iletirmektedir. Polimer modifiyeli bağlayıcılar ayrıca adezyon ve kohezyon özelliklerini geliştirmiştir. Polimerler agrega kaplama malzemesi şeklinde asfalt betonu karışımlara ilave edilebilir ve bu sayede yüzey pürüzlülüğü artmasından dolayı üstün mühendislik özelliklerine sahip asfalt karışımlar üretilmektedir [37-43].

Polimerlerin asfalt kombinasyonunda kullanımı 1980'li yıllarda başlamıştır ve dünyadaki birçok ülkede test edilmektedir. Hamid ve ekibine göre, öğütülmüş ve öğütülmemiş SBS polimer modifiye ile hazırlanan BSK'lar karşılaştırıldığında, öğütülmüş tipte olanlarda daha iyi sonuçlar elde edilmiş, laboratuvar testlerine göre gerilme dayanımlarında artış, yoğunlukta azalış ve hava boşluğu ile agrega hacminde hafif artış sağlanmıştır [44].

Mohammad ve diğerleri yaptıkları araştırmada, polietilen polimerleri asfalt karışım özelliklerini arttırmada bir tür olarak kullanmıştır. Sonuçlar taşlanmış yüksek yoğunluklu polietilen modifiyelerin (HDPE) daha iyi mühendislik özellikleri sağladığını göstermiştir. Stabilitenin arttığı, yoğunluğun azaldığı ve hava boşluğu ve mineral agrega boşluğunun hafif bir şekilde arttığı belirlenmiştir. Bitüm içeriği ağırlığının %12'sinin modifiye olarak kullanılması tavsiye edilmektedir [45].

Şu anda en yaygın şekilde bitüm modifikasyonu için kullanılan polimerler; stiren butadien stiren (SBS), stiren butadien kauçuk (SBR), etilen vinil asetat (EVA) ve polietilendir. Elastomer sınıfına göre SBS blok kopolimerler, bitümün elastikiyetini arttırmıştır. Düşük sıcaklıkla esnekliğin artmasına rağmen bazı araştırmacılar yüksek sıcaklıklarda, gerilme ve penetrasyon direncinin azaldığını iddia etmektedir [46,47].

Polimer modifiyeli bitümlerin morfolojileri, sonuç olarak polimer ve bitümlerin karşılıklı etkileri ve özellikle doğal polimer ve onun içeriğinden etkilenmektedir [48].

Şengöz ve Işıkyakar, SBS ve EVA kopolimerler içeren modifiye bağlayıcılarla ilgili laboratuvar çalışmalarını yürütmüşlerdir. Geleneksel bitüm testleri ile aynı temel bitüm

için farklı içerikler ile üretilen SBS ve EVA PMBs özelliklerindeki farklılıklar ölçülmüştür. Konvansiyonel penetrasyon, yumuşama noktası, ince film etüv testi, Brookfield viskozite testlerinden; SBS ve EVA modifiyeli bitümlerin rijitlik, sertlik ve sıcaklık hassasiyeti gelişiminin iyi bir şekilde arttığı görülmüştür. SBS katkılı bitümler, EVA katkılı bitümler ile karşılaştırıldığında; daha yüksek polimer içeriğinde daha yüksek derecede gelişmeler görülmüştür. Sıcak asfalt karışımların (HMA), SBS ve EVA PMBs içeriğindeki mekanik özellikleri ve temel bitümün sıcak asfalt karışıma katılması ile karşılaştırılarak analizleri yapılmıştır. SBS PMB katkılı numuneler ile hazırlanan sıcak asfalt karışımların Marshall stabilitesinin, polimer içeriğinin artması ile arttığı sonucuna varılmıştır. Hem SBS hem de EVA içeren asfalt karışımlardaki akma değerleri, kontrol karışımlardan daha yüksek olmasına rağmen modifiye karışımlar da daha fazla sürekli deformasyon direnci ortaya çıkmıştır. Bu yüzden polimer ilavesinin, sıcak asfalt karışımlardaki agregaların adezyon yeteneğine katkı sunduğu sonucuna varılabilir. Ayrıca polimer modifikasyonunun; penetrasyon, yumuşama noktası, sıcaklık hassasiyeti vs. geleneksel temel bitüm özelliklerini geliştirdiği tespit edilmiştir [49].

Tayfur ve diğerleri, kontrol ve modifiye asfalt karışımların mekanik özelliklerinin tespit edilmesini araştırıp, geleneksel ve 5 farklı modifiye asfalt sıcak karışımlar, kalıcı deformasyon dirençleri bakımından incelenmiştir. Amorf polifaolefin, selüloz fiber, poliolefin, bitümlü selüloz fiber ve SBS katkı olarak kullanılmıştır. SBS katkılı karışımların, tekerlek izi açısından en yüksek dirence sahip olduğu bulunmuştur. Tayfur ve ekibine göre, performans bakımından geleneksel karışımlara göre modifiyeli karışımlarda daha fazla kalıcı deformasyon direnci görülmüştür [50].

Lu ve Isacson, Stiren-butadien-stiren kopolimer (SBS) modifiyeli bitümlerin reolojik özellikleri üzerine çalışma yürütmüşlerdir. Bu araştırmacılar, SBS polimer ilavesinin yüksek sıcaklıklarda bağlayıcı elastikliğinde artış ve düşük sıcaklıklarda bağlayıcı esnekliğinde gelişme gösterdiğini gözlemlemiştir [51].

Hussein ve diğerleri, asfalt bağlayıcıları düşük yoğunluklu polietilen (LDPE) ve etil vinil asetat (EVA) polimerlerle modifiye ederek, polimer modifiyeli asfaltların (PMAs) yapı ve özelliklerini araştırmıştır. EVA polimer modifiyeli asfaltların LDPE modifiyeli asfatlardan daha az sıcaklık hassasiyetinde olduğu bulunmuştur. PMAs'ların düşük sıcaklık özellikleri ve kısa süreli yaşlanma testleri polimer tipinden etkilenmemekte, diğer taraftan yüksek sıcaklık özellikleri LDPE'lerin ortalama moleküler ağırlıklarından (Mw) ve EVA'lardaki vinil asetat (VA) içeriğinden kuvvetli bir şekilde etkilenmektedir. Genel

olarak, düşük içerikli VA içeren EVA'lar yüksek sıcaklık deformasyonları, en yüksek servis sıcaklığı hem de en iyi depolama stabilitesi için en iyi ısı direnci göstermiştir. Polimer modifikasyonu asfaltların reolojik özelliklerini geliştirmiştir [52-54].

Hussein ve ekibi çalışmalarında, iki LDPE reçineler ve iki EVA polimerleri asfalt bağlayıcıda katkı malzemesi olarak kullanmış ve Marshall Metodu karışım dizaynına göre, asfalt betonu karışımlar hazırlanmıştır (ASTM D 1559). EVA içeren LDPE ve VA ortalama moleküler ağırlık (M_w) etkileri; Marshall stabilitesi, nem hassasiyeti (AASHTO T283-89), esneklik modülü (M_r) ve tekerlek izi kalıcı deformasyon testlerinin yapılması ile çalışılmıştır. Çalışmada; polimer tip ve polimer modifiye asfalt betonu karışımlar (PMAM) üzerindeki yapı etkileri araştırılmıştır. Polimer yapı etkileri LDPE ve VA içerikli EVA'nın PMAM'ın özellikleri üzerindeki moleküler ağırlık etkilerinin çalışılması ile gözlenmiştir. Düşük VA içerikli EVA, asfalt betonu karışımlar (HMA) ve diğer polimer modifiye asfalt betonu karışımlar (PMAMs) ile karşılaştırıldığında, Marshall stabilite testinde daha düşük stabilite kaybı ve nem hassasiyet testindeki direncinde gelişmeler olduğu görülmüştür [55].

Çoğu araştırmalar çalışmalarını, polimerlerin farklı tipleriyle modifiyeli asfalt bağlayıcı olarak polimer modifiyeli asfalt (PMA) üzerine yapmıştır. Goodrich, asfalt betonu karışımının performansındaki asfalt bağlayıcı ve PMA performansı ile ilgilenmiştir. PMA'ların sıcaklık hassasiyeti, durabilite kuvveti ve düşük sıcaklık yumuşaması gibi PMA performansını, bağlayıcıların karışım performansı ile bağı olmadan gözlemlemiştir. Sıcak karışım asfaltların geleneksel asfalt bağlayıcı testleriyle yüksek gerilme içeriğinde anlamlı bir ilişkinin olmadığı anlaşılmıştır [56].

Murphy vd., modifiyer olarak polietilen, polipropilen, polyet poliüreten ve kauçuk gibi geri dönüşüm polimerleri kullanmışlardır. Performanslar; viskozite, penetrasyon, yumuşama noktası, yaşlanma ve reoloji ölçümleri ile değerlendirilmiştir. Ayrıca indirekt çekme rijitliği ve tekerlek izi direnci gibi karışım testleri yapılmıştır [68]. Diğer çalışmalarda, Anderson ve diğerleri, düşük sıcaklık bağlayıcı rijitliği ve sıcak asfalt karışım rijitliği ve zayıf korelasyonunu çalışmışlardır [57]. Ancak çoğu araştırmacılar (Panda ve Mazumder [58], Chen vd. [59], Hansen ve Anderton [60], Parker ve Brown [61], Perdemo vd. [62], Zoorob ve Suparma [63], Zhou vd. [64], Amirkhanian ve Williams [65]) HMA ve PMAM özelliklerini araştırmış ve asfalt betonu karışım arasındaki performans gelişimlerini karşılaştırmışlardır. Dahası, Berthelot ve diğerleri [66] ile Krishnan ve Rao [67] gibi bazı araştırmacılar HMA modellerinin viskoelastik özellikler, permeabilite vs. gibi davranışlarını çalışmışlardır.

Sonuç olarak katkı kullanımının, bağlayıcı ve asfalt betonu karışımların performans özelliklerini arttırdığı saptanmıştır. [57-68].

Yılmaz ve Kök çalışmalarında, bitüm modifikasyonunda katkı maddesi olarak SBS kullanımının bitümlü bağlayıcının yüksek sıcaklık performansına ve işlenebilirliğine etkisini araştırmıştır. Test sonuçlarından SBS oranı arttıkça karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarının arttığı tespit edilmiş, dolayısıyla tekerlek izi oluşumuna karşı dayanım ve yüksek sıcaklıklarda elastiklik bakımından avantaj sağlanacağı düşünülmektedir [69].

Ahmedzade ve Yılmaz'a göre modifiyer olarak kullanılan SBS'nin, ısı duyarlılığı, rijitlik ve yaşlanma özellikleri üzerindeki etkileri incelendiğinde, modifikasyondaki SBS'in artmasına bağlı olarak bağlayıcı rijitliklerinin arttığı, ısıya karşı duyarlılığın ve yaşlanma etkisinin azaldığı belirlenmiştir [70].

Mulder ve Whiteoak [71] ile Vonk vd. [72] yaptıkları çalışmalarda, bitümün polimer katkıları kullanılarak modifiye edilmesiyle, yaşlanma etkisinin azalabileceğini belirlemiştir.

Hınıslioğlu ve Ağar tarafından, asfalt betonuna ilave edilen çeşitli plastik atıklardan elde edilen yüksek yoğunluklu polietilen kullanımının uygunluğu araştırılmaya çalışılmıştır. Çeşitli karışım zamanları, karışım sıcaklıkları ve HDPE içeriğindeki HDPE modifiye bağlayıcı etkileri, Marshall stabilitesi, akma ve Marshall akma oranındaki stabilite araştırılmıştır. HDPE modifiyeli asfalt betonuyla ilgili Marshall stabilite ve Marshall deformasyon dirençleri sonuçlarında önemli şekilde artışlar görülmüştür. Sonuç olarak atık HDPE modifiye bitümlü bağlayıcıların kalıcı deformasyonlara karşı yüksek Marshall stabilite değerlerine sahip olduğu ve plastik atıkların geri dönüşüm olarak çevreyi korumaya katkı sağladığı görülmüştür [73].

Atık plastik miktarı gün geçtikçe artmaktadır. Bu yüzden esnek kaplamalarda kullanılan atık plastikler, kolay bir şekilde kullanılıp atılan atık plastikler için en iyi seçim yöntemi olan metotlardan biridir. Polietilen, polipropilen, polistiren olarak adlandırılan atık polimerler, erime aşamalarında yapışma özelliği göstermektedir. Bu yüzden atık plastiklerde agregaların kaplanması kullanılmıştır. Plastik kaplanan agregaların porozitesi ve su absorpsiyonu azalmıştır. Polimerle kaplı agregalı bitüm karışımlar, esnek kaplama yapısı için daha iyi malzeme formundadır. Karışım olarak daha yüksek Marshall stabilitesi değerleri görülmüştür. Polimerle kaplı agregaların kullanılması birçok bakımdan polimer modifiyeli bitümlerin kullanılmasından daha iyidir [74].

Kumar ve çalışma ekibi, SBS ve LDPE içeren karışımların performansları üzerine yapılan laboratuvar araştırmalarını sunmuştur. Modifiyeli bağlayıcı karışımların fiziksel ve mekanik özellikleri elde edilmiştir. Polimer modifiyeli karışımların dayanım özellikleri ve nem hassasiyeti üzerinde gelişme sağlanmıştır. Modifiye edilmemiş karışımlara göre daha iyi kalıcı deformasyon dayanımı ve dinamik sünme sonuçları bulunmuştur. 4,2 ve 4,6 kat daha yüksek ömürlü yorulma değerleri elde edilmiştir. Araştırmalarında asfalt karışım performansının polimer ilavesi ile artırılabilceği görülmüştür. Bunun yanında kalıcı deformasyon ve hizmet ömrü de modifiye edilmemiş karışımlara göre daha iyi çıkmıştır.

Polimer modifiye karışımlar yüksek yoğunluklu ve kaplama ısısının fazla olduğu yollarda tavsiye edilmektedir. SBS modifiyelerin hizmet ömrü ve oluklanma dayanımı LDPE’lerde daha iyi olmuştur [75].

Lu vd., SBS polimer modifiyeli bitümlerin düşük sıcaklık özelliklerinin laboratuvar değerlendirmesini sunmaktadır. SBS içeren modifiye bitümlerin düşük sıcaklık özellikleri geleneksel metotlar, dinamik mekanik analizler (DMA) ve kırılgan eğme reometresi kullanılarak araştırılmıştır. Esas bitümler ve polimerlerin karakteristik etkileri ve bu özellikler üzerindeki öğelerin uygunluğu (oranları) üzerinde çalışılmıştır. Sonuçlar göstermiştir ki; SBS polimerler, bitümlerin düşük sıcaklık özelliklerini düzeltmiştir. İlerleme derecesi genellikle SBS içeriği ile artmış ve SBS yapısı az bir şekilde etkilenmiştir [76].

Fu vd., yüksek sıcaklıktaki stiren-butadien-stirenol üçlü blok eş polimer (SBS) modifiyeli asfalt bağlayıcıların performansı, gama (γ) ışını altındaki vinil monomer ile SBS-g-M aşılmasının ilavesiyle önemli gelişmeler olabileceğini belirtmişlerdir. Aşılamadan önceki ve sonraki SBS modifiyeli asfalt bağlayıcıların dinamik mekanik özellikleri dinamik kesme reometresi ile tanımlanmıştır. SBS-g-M ilavesinin bağlayıcıların reolojik özelliklerinde büyük etkilere sahip olduğu bulunmuştur ve yüksek sıcaklık performansı, SBS modifiyeli asfalt bağlayıcı ile karşılaştırıldığında, sıcaklık hassasiyetindeki azalma sağlanmıştır [77].

Von Quintus ve arkadaşları, PMA içeren karışımların kullanılmasındaki yararları belirlemek için Kuzey Amerika’daki kaplama kesitlerini araştırmışlardır. Test kesitlerinde, geleneksel BSK ve PMA esaslı hızlandırılmış kaplama test kesitlerini içeren yollar, performans karşılaştırmalarında kullanılmıştır. PMA ve geleneksel kesitler arasında yapılan performans karşılaştırmasında, PMA kullanımının, sadece esnek kaplamaların tekerlek izi direnci performansını değil, aynı zamanda yorulma ve çatlak performansında

önemli oranda arttırdığı belirlenmiştir. Polimer kullanımı, asfalt karışımların dinamik stabilitesini arttırdığı ve tekerlek izi derinliğinde kullanımında tekerlek izi direnci olarak daha iyi ölçümler elde edilebilir. Polimerler, asfalt karışımların düşük sıcaklıklarda eğilme davranışını arttırmıştır. PMA içeren karışımların kullanılmasıyla BSK kaplamalarının servis ömrünün 5 yıldan 10 yıla uzadığı saptanmıştır [78-83].

Kuloğlu, Karakaş vd. yaptıkları çalışmada, BSK karışımların arazi performanslarının değerlendirmesini yapmış, kaplamanın bir yıl içinde maruz kaldığı toplam sıcaklık indeksi ile rijitlik modülü ve stabilite arasında doğrusal bir ilişkinin olduğunu, SBS katkılı numunelerin saf karışımlara göre daha fazla stabilite ve rijitlik modülüne sahip olduğunu tespit etmişlerdir [84].

Modifiye bitümlerin laboratuvarlarda hazırlanmasındaki amaç daha düşük maliyetler için daha iyi performanslı, az kalınlıklı, yüzey tabakalarının oluşturulması için yeni kaplama formülleri geliştirilmesidir. Saoula ve ekibi çalışmalarında, EVA içerikli BSK ile hazırlanan asfalt betonu kaplamaların davranış özelliklerini değerlendirmiştir. Modifiye bitümlerin esnekliğinde artış sağlanmıştır [85].

Stiren-Butadien-Stirenol üçlü blok eş polimer (SBS) modifiye asfaltların yüksek sıcaklık stabilitelerine, doğal sülfürün ilavesi ile önemli gelişmeler olabilir. SBS modifiye asfaltların dinamik mekanik özellikleri sülfür ilavesinden önce ve sonra dinamik kesme reometresi kullanılarak tanımlanmıştır. SBS modifiyeli asfaltlara sülfür ilavesi, modifiye bağlayıcılar içindeki kimyasal olarak kükürtle sertleşmiş (vulkanize) SBS ağının oluşumuyla, bağlayıcıların yüksek sıcaklık performansı geliştirilir ve onların sıcaklık hassasiyetinde büyük ölçüde azalma olmasıyla sonuçlanır. SBS modifiyeli asfaltların reolojik özellikleri, büyük ölçüde kuvvetli bir şekilde sülfür düzeyine bağlıdır. Sülfür düzeyindeki artış modifiye bağlayıcılardaki çapraz bağ artışına yol açar ve sonuç olarak SBS modifiyeli asfaltların reolojik özellikleri gelişir. Wen ve ekibi tarafından 3 farklı SBS yapısı ile bitüm özellikleri arasında karşılaştırma yapılmıştır. SBS yapısı sülfür ilavesi ile geliştirilen SBS modifiyeli asfaltların uyarlık ve depolama stabilitelerini etkilemiştir. Asfalt viskozitesindeki artış dönel viskozimetre tarafından saptandığı için sülfür ilavesi öncesi ve sonrası SBS içeriğinde doğrudan orantılı değildir. Optik mikroskop tarafından tanımlanan SBS modifiyeli asfaltların morfolojisi, asfaltın uyarlık ve depolama stabilitesinin sülfür ilavesi ile ilerlediğini göstermiştir [86].

Syroezhko ve çalışma arkadaşları, sülfür içeriğine dayalı asfalt kaplamaların geleneksel olanlarla karşılaştırıldığında daha iyi durabilite sağladıklarını ispat etmiştir [87].

Asfalt karışımların performansları ile ilgili özellikler olarak asfalt bağlayıcıların temel özelliklerini geliştirmede, soyulma önleyici ilaveleri ve polimer modifikasyonları, iki önemli modifiye olarak kullanılmaktadır [88].

Kök ve Kuloğlu yaptığı çalışmada, farklı penetrasyon değerlerindeki bağlayıcıların, sıcak asfalt karışımların mekanik özelliklerine olan etkilerini; AC-5, AC-10, AC-20 ve SBS modifiyeli AC-10 ile hazırlanan numuneler üzerinde rijitlik modülü, sünme rijitliği, indirekt çekme dayanımı oranı ve Marshall stabilite testleri uygulayarak araştırmıştır. Uygulanan testlerde farklı penetrasyona sahip asfalt çimentolarıyla hazırlanan numunelerde farklı performansların sergilendiği ve bütün test sonuçlarında en iyi performansın, modifiyeli AC-10 ile hazırlanan karışım numunelerinde olduğu görülmüştür [88].

Bitüm üretiminde distilasyon yoluyla ham petrole katılabilen balmumu ile modifiye bitümler elde edilmektedir. Balmumu katkılı bitümlerin reolojik ve asfalt karışım performanslarına, tekerlek izi, düşük sıcaklık çatlakları ve su hassasiyeti gibi etkileri incelenmiştir. Bitüme doğal balmumu katılmasının, düşük sıcaklıklarda fiziksel sertleşme, daha yüksek sıcaklık çatlamlarına ise eğilimli olduğu görülmüştür. Su hassasiyeti olarak bitüme balmumu ilavesi herhangi bir etkiye yol açmamıştır. Sonuç olarak bitümün reolojik özellikleri yüksek servis sıcaklıklarında, çoğu durumda balmumu katkısı ilavesinden etkilenmemiştir [89-94].

Edward vd., ticari mumların asfalt betonu karışımlar üzerine etkilerini araştırmıştır. Sonuçlar; ticari mum içeren bitümler ile hazırlanan asfalt karışımların dinamik sünme testi ile en düşük gerilme değerleri tespit edilmiş, tekerlek izi oluşumlarda daha iyi direnç belirlenmiştir [95].

Iswandaru, geri dönüşüm asfalt karışımların (RAP) mekanik ve amprik yaklaşım kullanımı ile değerlendirmesini yapmıştır. Çalışmalarda performans testleri yapılmış, tekerlek izi ve yorulma direnci optimize edilmiştir. Geri dönüşüm asfalt karışımlar geleneksel asfalt karışımlara göre daha iyi performans göstermiştir [96].

Kim ve El Hussein, -5°C'den -30°C'ye düşük sıcaklıkta asfalt betonu karışımların mekanik özellikler bakımından kırılma dayanıklılığını deneysel olarak tespit etmiştir. -15 °C'de asfalt betonu karışımın kırılma dayanıklılığının azaldığı tespit edilmiştir. Bu durumun nedeninin agrega ve asfalt çimentosu arasındaki termal büzülme katsayısındaki büyük farkın bir sonucu nedeniyle termal büzülme iç hasar etkisi olarak açıklanmıştır [97].

Alev geciktirici asfalt bağlayıcılar, çeşitli kimyasal katkıların ilavesi ile hazırlanmaktadır. Alev geciktirici katkılı bağlayıcıların kullanılması, yangıcı kaza miktarlarını azaltmıştır. Cong ve diğerleri, asfalt ve dekarbomodifenil eter (EBPED), antimon trioksit ve çinko borat (ZB) ile modifiye edilmiş karışımların özelliklerini tespit etmişlerdir. Termal analiz ve infrared spektroskopisi (IR) ile asfalt bağlayıcıların fiziksel ve mekanik özellikleri üzerine alev geciktiricilerin etkileri araştırılmıştır. Sonuç olarak asfalt, yangıcı bir malzemedir. Alev geciktirici SBS modifiyeli asfalt karışımları ile daha iyi alev geciktirici ve kaplama performansı elde edilmiştir [98-106].

Peiliang ve diğerleri, alev geciktirici modifiyeli asfalt karışımlarının alev gecikmesi ve asfalt performansında iyi sonuçlar verdiğini tespit etmiştir [107].

Çelik köprülerde kullanılan bitümlü karışımlar, çok kesilen basınç ve gerilmeler sunmaktadır. Bu yüzden yorulma çatlağı azalması için özel gereksinimlere ihtiyaç duyulduğundan, kaplama performansının geliştirilmesi gerekmektedir. Ghaly'in yaptığı çalışmada, modifiye bitümlerin geleneksel özelliklerini (penetrasyon, yumuşama noktası ve dinamik viskozite) incelemiştir. Sıcak asfalt karışımlardaki modifiye bağlayıcıların etkileri tekerlek izi, Marshall özellikleri, indirekt çekme gerilmesi (IDT) ve esneklik modülü (MD) testleri yoluyla araştırılmıştır. Tekrarlanan yükler sonucu yorulma ömürleri ayrıca araştırılmıştır. Modifiye asfalt karışımlarının trafik yükü altında ve çevresel durumlarda en iyi davranışı Mısır Kahire'deki, Dar El-Sallam Çelik Köprüsünde izlenmiştir. Düşük yoğunluklu polietilen (LDPE) kullanımı asfalt karışımlarda işlenebilirlik ve yorulma çatlağı ömründe olumsuz etki yaratmıştır. Yüksek servis sıcaklığındaki modifiye asfalt karışımlarının kalıcı deformasyon direnci ve düşük servis sıcaklığındaki tekrarlanan yorulma çatlağı sayısı SBS katkılı olanlarda artmıştır [108].

Ahmed ve ekibi, mineral filler olarak atık çimento tozunun kullanım etkilerinin sıcak asfalt karışımlarının mekanik özellikleri üzerinde etkilerini araştırmıştır. Marshall test sonuçlarından; atık çimento içeriği yüzdesi arttığı zaman birim ağırlık ve stabilitenin arttığı, akma değerinin, boşluk oranı ve agregalar arası boşluğun azaldığı görülmüştür. İndirekt çekme gerilmesi ve basınç gerilmesi, atık çimento tozu oranı artışı ile artmıştır [109].

Yol inşaatında modifiye olarak endüstriyel atık olarak yüksek fırın cürufu, uçucu kül, inşaat ve yıkım atıkları, sökülmüş beton yol kaplamaları, sökülmüş asfalt yol kaplamaları ve gübre fabrikası atıkları (fosfojips) başta gelmektedir [110-113].

Hem doğal hem de çevresel doğal alanları korumak ve muhafaza etmek, tüm gelişmekte olan ülkelerde ortak amaçtır. 1997 Kyoto Protokolü ile dünyadaki emisyon miktarının 2012'ye kadar %5.2 kadar azaltılması hedeflenmiştir. Son yıllarda yol mühendislik ürünlerinde yeni çevresel teknikler ve malzemelerin kullanılması artmıştır. Bu malzemelerden biri farklı tekniklerle yapılan asfalt emülsiyonu, mumlar ve parafinler, yumuşak ve sert bağlayıcı bileşeni ve sentetik zeolitin kullanıldığı ılık asfalt karışımlardır (WMA). Bu tür asfalt karışımlar geleneksel sıcak asfalt karışımlar ile karşılaştırıldığında, daha düşük karışım ve sıcaklık yayılımı, izin verilen daha düşük CO₂ ve emisyon buharı vermektedir. Sonuç olarak sağlık açısından daha düşük risk ve düşük enerji tüketimi vardır. Ayrıca WMA'nın kullanılması soğuk mevsimlerde daha yüksek işlenebilirlik, sıkıştırmadan sonra daha az zamanda trafiğe kapalılık süresi ve daha uzun taşıma süresi gibi faydalar sağlamaktadır [114].

Yao ve Monismith, ağırlıkça %15-20 Microfil 8 ilavesinin asfalt karışımların özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmış ve tekerlek izine karşı direncin, yoğunluğun ve esneklik modülünün geliştiğini bulmuşlardır [115]. Ayrıca Button ve ekibi, AC 100-150 penetasyonlu asfalta %15 Microfil 8 ilavesinin daha sert olan AC 60-70'e kıyasla kalıcı deformasyona karşı direncini önemli ölçüde artırdığını belirtmişlerdir [116].

Sönmez ve ekibi, dünyada en çok kullanılan plastomer, elastomer, doğal hidrokarbonlar, Trinidad göl asfaltı ve selülozik elyaf esaslı katkı maddelerinin BSK performansı üzerindeki etkileri ve birbirlerine karşı üstünlüklerini incelemişlerdir. Tekerlek izi oluşumunda bütün modifiye katkılı karışımların, geleneksel karışımlara göre üstün performans sağladığı görülmüştür. BSK'ların maruz kaldığı yükler, çevre ve diğer olumsuz etkileri karşısında, katkı maddeleri farklılıklar göstermiş ve birden fazla olumlu etkisi olduğu görülmüştür [117].

Sıcak asfalt karışımlarda kullanılan sulu kireçler, katkı maddesi olarak birçok fayda sağlamaktadır. Sulu kireç katkı maddesi soyulmayı azaltır. Mineral filler olarak asfalt bağlayıcı ve sıcak asfalt karışımı sertleştirir. Kırılma direnci büyümesini düşük sıcaklıklarda iletir. Oksidasyonun kinetiği ve onların zararlı etkilerini azaltmada oksidasyon ürünleri ile etkileşimini olumlu bir şekilde değiştirir. Kil tanelerindeki nem stabilitesi ve durabilitesini düzelterek plastik özellikleri değiştirir [118].

Al-Hourani ve Khedaywi, 1989 yılında asfalt kaplama karışımlarının dayanıklılıklarını artırmak için polimer ve kalker tozu katkılı karışımların performansını incelemişlerdir.

Sonuç olarak, karışıma eklenen %10 oranındaki kalker tozunun Marshall stabilite, çekme gerilmesi ve kohezyon değerlerini arttırdığı görülmüştür [119].

Wasfi ve Khedaywi, 1991 yılında bazı filler tiplerinin binder tabakasındaki bitümlü karışımların özellikleri üzerine bir çalışma yapmışlardır. Araştırma sonuçları göstermiştir ki; %6 çimento kullanılan bazalt karışımları ve %6 sönmüş kireç ve kalker tozu kullanılan granit karışımları iyi sonuçlar vermiştir [120].

Chen ve Lin, 2005 yılında yaptıkları çalışmalarında, fiber içerikli bitümlü karışımların gerilme mekanizmasını araştırmıştır. Fiberler olarak selüloz, taş yünü ve polyester tipleri bitüme ilave edilmiştir. Viskozite, dayanıklılık ve direnç, mikroskobik ve reolojik testler, bitümlü fiber mastiklerin mühendislik özelliklerini karakterize etmek için yapılmıştır. Test sonuçları; fiber kullanımının kritik olarak artırımının, dayanım etkilerinin de arttırdığı görülmüştür. Daha yüksek karışım sıcaklıklarında bitümlü mastiklerin daha yüksek viskozite oranları vardır. Bitümlü fiber mastiklerin gerilme dayanımları fiber konsantrasyonunun artmasıyla artmıştır [121].

Bitüm içine fiber ilavesi ile asfalt bağlayıcı elde edilmesi, fiberler ile daha önce yapılan birçok uygulamalara rağmen sırasıyla asfalt kaplama teknolojisinde yeni bir konsept olarak ortaya çıkmıştır [122,123].

Orijinal bir şekilde fiber potansiyeli, çimento içerikli betonlarda ve hafif ağırlıklı yapılarda yapı malzemesi olarak 50 yıldan daha fazla bir süredir kullanılmaktadır. Son Karayolu Birimleri araştırmalarında, matriks asfalt ve gözenekli asfalt uygulamalarında Avrupa, Amerika ve diğer ülkelerde hemen hemen her projede fiberlerin bazı şekillerde kullanımını göstermiştir [124-131].

Son yirmi yıldır toprak ve çevredeki hidrokarbon esaslı kirlilik miktarı hızlı bir şekilde artmış ve halen bu atık maddelerin önemli bir kısmını asfalt karışımlarda kullanılan silindir yağlar teşkil etmektedir. Tarefder ve diğerlerine göre atık madde miktarlarındaki artış, depolama ve ortadan kaldırma alanlarına önemli miktarda yük getirmektedir ve iş sahipleri ile sanayi için artan maliyet ve uzun süreli borçlara neden olmaktadır [132].

Literatürde çeşitli yağların asfalt karışımlara etkileri incelenmiştir. Schoenberger ve arkadaşları, 1999 yılında asfalt kaplama malzemesi üretmek için kirlenmiş dizel içerikli zeminlerin etkisini incelemiştir. Sonuçlar karayollarında hemen hemen 4 yılda iyi sonuçlar verdiğini ve mükemmel durumda kaldığını göstermiştir. Bu süre zarfında yolda bakım yapılmamıştır [133].

Borhan ve arkadaşları, silindir yağı (UCO) kullanılarak hazırlanan asfalt betonu uygulamasını değerlendirmek üzere deneyler yapmıştır. Bu deneylerde modifiye asfalt karışımların mekanik özellikleri saf asfalt karışımlar ile karşılaştırılarak incelenmiştir. Bütün numunelere Marshall stabilitesi, dolaylı çekme dayanımı, dolaylı çekme ve statik, dinamik sünme testler uygulanmıştır. UCO ilavesi ile asfalt-uco bağlayıcılarda yumuşama gözlenmiştir. Sonuç olarak; asfalt betonu karışımlardaki UCO etkileri, karışım içinde kullanılan UCO'nun yüzdesine ve hem de UCO-asfalt arasındaki kimyasal etkileşime bağlı olduğunu göstermiştir [134].

Suliman ve Awwad, asfalt çimentosunda bir genişletici olarak bitümlü şisti kullanmışlardır. Şist katkılı bağlayıcılar tutarsız fiziksel özellikler göstermiştir. Bu durum asfalt çimentosu ile şist içerikli yağların uyumsuzluğundan veya iyi karıştırılmadıklarından dolayı olabilir [135].

Asi ve Assa'd yaptıkları çalışmada, Ürdün petrolerindeki bitümlü şist ucucu küllerin asfalt karışımlar üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Modifiye ve kontrol karışımlar dinamik sünme testi ile karşılaştırılmış, uçucu kül içerikli bitüm modifikasyonlarının diametral esneklik modülünü geliştirdiği görülmüştür [136].

Villanueva ve ekibi, asfalt modifiye olarak makine yağını kullanmıştır. Kullanılan modifikasyon ile superpave düşük sıcaklık performans derecesini (PG) geliştirdiği tespit edilmiş fakat yüksek sıcaklık PG derecesi (PG) superpave numunelerine göre değerlendirildiği zaman düşük sıcaklık derecesindeki modifiye asfaltlardaki kırılgan eğme reometresi (BBR) test değerlerine göre başarısızlıktan dolayı önemli bir şekilde gelişmemiştir. Fakat kullanılan yağların, agrega yapışmasında azalma, sıyrılma gibi asfalt kalitesinde zararlı etkileri olabilir [137].

Kuloğlu ve Kök'ün yaptıkları deneysel çalışmada, 10mm göz açıklığı ve 1mm çapa sahip çelik donatılı asfalt kaplamada, stabilitenin yaklaşık %50, eğilme mukavemetinin %100'ün üzerinde arttığı gözlenmiştir. Üst yapının performansının önemli derecede iyileştiği tespit edilmiştir [138].

Potter ve Mercer, kamu yollarında ve aslı ölçüsünde hızlandırılmış test tesisi üzerinde birkaç deneysel çalışma yürütmüşlerdir. Çalışmalarında geri dönüşüm malzeme kullanımının performansları, deneysel olarak tespit edilmiştir. Yapılan çalışmalarda, geleneksel malzemelere göre geri dönüşüm malzeme kullanımının daha iyi performans gösterdiği sonucuna varılmıştır. Diğer araştırmalar farklı yüzdelerdeki (0, 30, 50 ve 70)

geri dönüşüm malzeme katılımının, sıcak asfalt karışımlardaki mekanik özelliklerinin belirlenmesini içermektedir [139,140].

Li vd. tarafından, geri kazanılmış atık polimerlerin, sıradan modifiyer yerine kullanılarak, modifiye edilmiş asfaltın kaplama performansında ve yeni asfaltın kompozit modifikasyonunda taşıyacak şekilde adapte edilmesi araştırılmıştır. Modifikasyondan sonra, yorulma yanı sıra yüksek sıcaklığa duyarlı, düşük sıcaklıkta anti çatlak performansı, yüksek sıcaklıkta tekerlek izi direnci ve su direnci özelliklerinde, asfaltın kaplama performansı açısından, atık polimerin kompozit modifikasyonu ile iyileşme sağlanmıştır [141].

Prowell, çalışmasında Virginia bölgesinde yaygın olan mevcut sıcak asfalt karışımlar için fiberleri modifiye olarak değerlendirmiş, bütün örnek numunelerde 45 aylık hizmet süresinden sonra tekerlek izi dirençlerinde ve performanslarında iyi sonuçlar elde etmiştir [142].

Tapkin ve arkadaşları ise polipropilen (PP) fiberlerin kullanımı, lokal olarak bulunabilir ve diğer modifiyelerle karşılaştırıldığında, düşük maliyet olarak etkili bir seçenek olduğunu belirlemiş, ve bunun polipropilen fiberlerin ilavesinin tekrarlı sünme testi altında numunelerin ömürlerini artırdığı ve davranışlarını geliştirdiği görülmüştür [143].

Qui ve Ling tarafından, dört çeşit asfalt betonu (AC) kaplama tabakası karışımlarının konvansiyonel AC 20, kauçuk modifiyeli AC 20, polyester fiber güçlendirmeli AC 20 ve gilsonite modifiyeli AC 20 laboratuvar performans değerlendirmesinin detayları sunulmuştur. Test sonuçları ile çevresel sorunlar dikkate alındığında, kauçuk modifiyeli AC 20, Hong Kong'da kaplama yüzeyi için kullanılabilecek en uygun malzeme olarak önerilmektedir [144].

Yaşlanma sertleşmesi, asfalt kaplamalarında çatlağın ve diğer olumsuz durumların en önemli nedenidir. Kaplama performansında, asfalt bağlayıcılar ve onun zararlı etkilerinde yaşlanma sertleşmesini kontrol etmek için bir yaklaşım, antioksidanların kullanılması sayesinde olmaktadır. Apeagyei ve diğerleri araştırmalarında, asfalt yaşlanmasının, asfalt karışımların çatlak direncini önemli ölçüde azalttığını ve antioksidanların kullanımının, öngörülen çatlak hassasiyetini önemli ölçüde azalttığını tespit etmiştir. Bu çalışma, tam ölçekli alan denemelerinde, antioksidanların, asfalt karışımlardaki çatlakları azalttığını göstermiştir [145].

Li ve ekibi, grafit ve karbon fiberle modifiye edilen asfaltları incelemiş, grafit modifiyeli geçirgen asfaltlarda statik yükleme testi, özellikle yüksek yükleme hızında,

dolaylı çekme dayanımı, yorulma rijitlik modülünde pozitif etki göstermiştir. Çatlak ilerlemesini önleyen süreksiz karbon liflerin eklenmesinden sonra, geçirgen asfalt esaslı kompozitler iyi yorulma özelliği göstermiştir. Birleştirilmiş modifikasyon, asfalt betonunu güçlendirmiş, mekanik ve yorulma özelliklerini iyileştirmiştir [146].

Goh ve You, asfalt karışımında taban külü kullanımının, kontrol karışımlara göre daha düşük dinamik modüllere sahip olduğunu tespit etmiştir. Analiz sonuçlarından, kül içeren karışımlarda daha yüksek iz potansiyeli elde edilmiştir [147].

Sayyed ve ekibi, modifiye olarak dört tip lifi (cam, naylon 6.6, polipropilen ve polyester) kullanarak lif tipi asfalt betonu değerlendirmesini yapmıştır. Malzeme davranışını iyileştirmek için asfalt betonu kaplamada bu lifleri kullanarak bir yapay sinir ağı modeli geliştirmiş ve elyaf takviyeli karışımların kaplama performansını geliştirdiği anlaşılmıştır [148].

Ziari ve Khabiri, çelik çürüflü asfalt betonun yüksek sıcaklık stabilitesi ve sünme rijitlik performansını test etmiş ve sonuçlar tatmin edici olarak elde edilmiştir. Araştırma, asfalt betonunda atık çelik çürüf kullanmanın uygun olduğunu ve geri dönüşümünün mümkün olduğunu göstermiştir [149].

Tapkın çalışmasında, uçucu kül kullanarak asfalt-agrega karışımlarının mekanik özelliklerini araştırmıştır. Uygulanan yükler altında asfalt betonu kaplamasının davranışı önemli ölçüde etkilenecek, mekanik özellikler değişmiştir [150].

Taşınabilir trafik analiz ünitesi ile ilgili çalışmalarda; El Dolil ve diğerleri [151] mikro hücreli karayolları için bir boyutlu hareketlilik problemleri, Guerin ve Hong [152] ile Rappaport [153] hareket ve 2 boyutlu çevredeki sıradan kontrol ile trafiği, zaman tutucu kanalların incelenmesi ile birlikte modellemiştir.

Foschini vd., hareketle ilgili değişken tanımladığı parametreler belirlemiş ve hareketi veren bir trafik modeli önermiştir [154].

Meier-Helstern ve Alanso, rastgele hareket kullanıcıların farzı altında akışkan akıcı modeli kullanarak hareketin analizini yapmıştır [155].

Cho (1994), Kim ve Sung (1994), küçük hücre şeklindeki alanlara sahip ortamlardaki dönüş hareketlerine göre 2 boyutlu çevre hareket modellerini önermiştir [156,157].

Kim vd., 2 boyutlu hareket modelinin genişletilmesi ile bu hareket modeline dayalı ve hareket ile birlikte bir trafik örneği modelini yapmıştır [156-159].

Kim vd., kapalı alanlarda 3 boyutlu hareket ile trafik analizi yapmıştır [160].

2. KARAYOLU YAPISI

Karayolu alt yapı ve üst yapı olarak iki kısımdan oluşmaktadır.

2.1. Karayolu Alt Yapısı

Taşıt ve yayaların ulaşımını kolay bir şekilde gerçekleştirebilmeleri için kullandıkları karayollarındaki doğal zeminlerin, belli bir en kesite dönüştürülmeleri gerekmektedir. Yol en kesitinde bazı yerler kazılıp ve bazı yerler doldurularak toprak işi yapılmaktadır. Yolun, toprak işi sonunda, daha önceden belirlenen projeye uygun kot ve en kesit durumu şekline getirilmiş kısmı, yolun alt yapısını oluşturmaktadır. Alt yapı yolun esas taşıyıcı kısmıdır. Yolun dolgu kesimlerinde ihtiyaç duyulan toprak malzemesi ile yarma kesimleri doğal zeminlerden oluşmaktadır. Toprak işlerinin yanı sıra, yolun ömrünü uzatmak ve işlevini daha kusursuz hale getirmek için yapılan menfez, istinat duvarları, köprü, viyadük ve tünel gibi yapılar yol alt yapısı olarak kabul edilmektedir. Alt yapının taşıyıcılık görevini iyi bir şekilde yerine getirebilmesi için üzerine başka tabakalarında inşa olması gerekmektedir. 1920 yılına kadar yol yapımında daha çok kaplamaya dikkat edilip, alt yapıya fazla önem verilmemiştir. Bu tarihten sonra yapılan gözlem ve araştırmalarda, yolun bir yapı olarak öngörülen hizmet ömrü boyunca beklenen görevi yerine getirebilmesi için sadece üst yapının iyi bir şekilde yapılmasının yeterli olmadığı, üst yapının oturduğu alt yapı ve taban zeminin durumunun, yolun inşa maliyeti ve bakım masrafları gibi hususlarda büyük önem taşıdığı ortaya konulmuştur [161,162].

Yıldırım'a göre; alt yapıyı teşkil eden zeminin yoğunluğu, üst yapının taşıma gücüne ve su emme özelliğine etki etmektedir. Sıkıştırılacak zeminin cinsine göre kullanılan sıkıştırma vasıtaları değişiklik göstermektedir. Kumlu zeminlerde düz silindirler, killi zeminlerde keçi ayaklı silindirler, kohezyonu az olan zeminlerde lastik tekerlekli silindirler, kohezyonu az ya da kohezyonsuz zeminlerde vibrasyonlu silindirler tercih edilmektedir [163].

Sıkıştırma sayesinde zeminin;

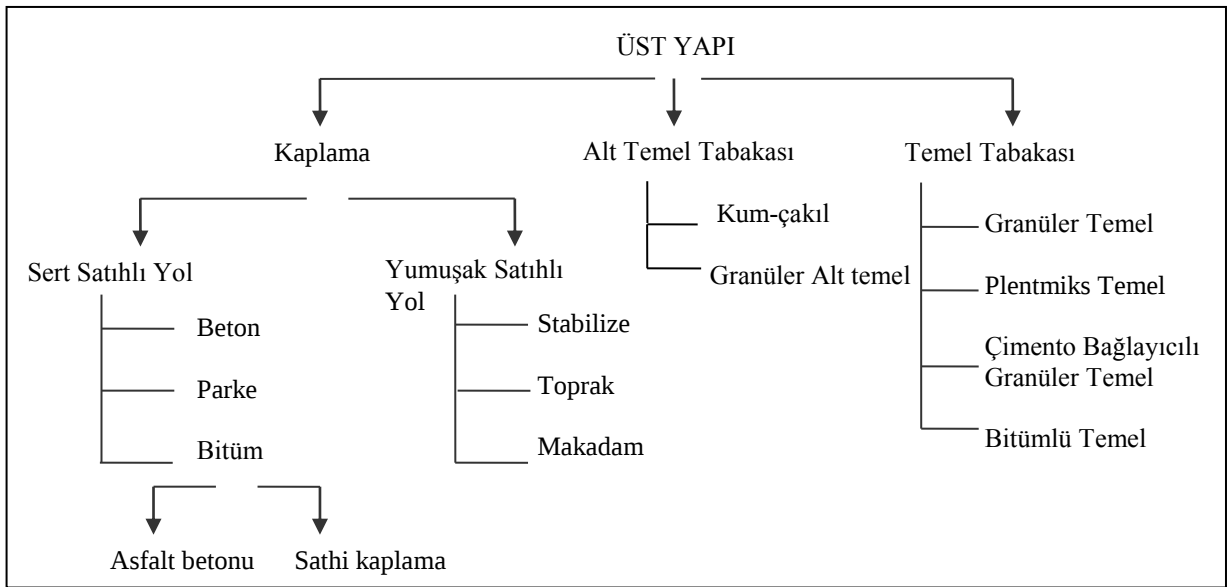
- Kayma direnci, dolayısıyla taşıma gücü artar.
- Permeabilite ve su emme kabiliyeti, dolayısıyla suyun zararlı etkileri azalır.

- Yolun hizmete açılmasından sonra trafik tesirleriyle meydana gelen oturmalar en aza indirgenir [164].

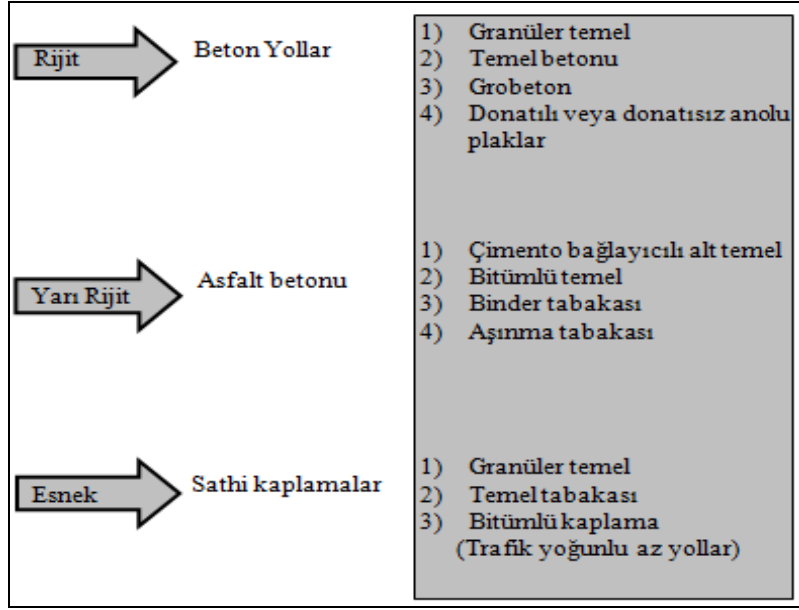
2.2. Karayolu Üst Yapısı

Yolun projesi ve niteliğine göre; alt temel, temel ve kaplama tabakalarından biri veya birkaçı ile oluşturulan, yola gelen trafik yüklerini taşıyan ve altyapıya ileten, karayolu araçlarının seyrine olanak sağlayan yapı üst yapı olarak adlandırılır.

Karayolu üstyapıları, kaplamanın cinsine bağlı olarak; esnek, rijit ve yarı rijit olarak sınıflandırılır. Karayolu üstyapısını oluşturan tabaka ve bu tabakaların türleri Şekil 2.1’de, rijitlik durumlarına göre sınıflandırılması ise Şekil 2.2’de gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Karayolu üst yapı tabakaları ve türleri



Şekil 2.2. Üst yapının rijitlik durumlarına göre sınıflandırılması [162].

Ülkemizde ve dünyada en çok kullanılan üstyapı tipi, esnek kaplamalardır. Esnek kaplamalı üstyapılar kaplama, temel ve alt temel olmak üzere üç ana tabakadan oluşmaktadır.

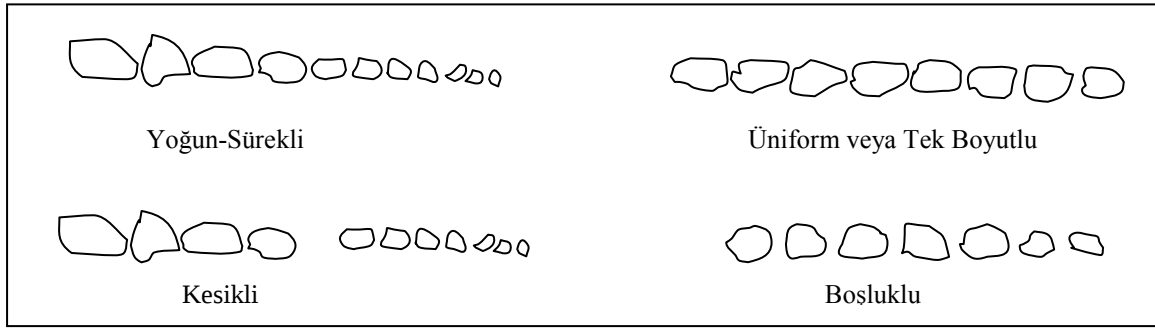
2.2.1. Kaplama Tabakaları

Kaplama tabakaları, trafik etkisinden dolayı oluşan yüklere ve çevresel koşullara maruz kalan en üst tabakasıdır. Kaplama tabakaları trafik yüklerinin yol açtığı basınç ve çekme gerilmelerinin en yüksek seviyede olması nedeniyle, üst yapının diğer tabakalarına göre daha yüksek elastisite modülüne sahip olmaktadır. Kaplama tabakası, suyun etkisine karşı geçirimsizlik sağlayarak, yolu bozulmalardan korumasıyla birlikte yazın toz, kışın çamur gibi konfor bozucu etkileri de önlemekte ve yol yüzeyinin düzgün bir şekilde olmasını sağlayarak konforun artmasına yardımcı olmaktadır. Kaplama tabakasının kalınlığının artması ise yolun direncini arttırmakta, üzerine gelen yükün büyük çoğunluğunu karşılayarak temel ve alt temel tabakalarına iletilen basınç gerilmelerini azaltmaktadır [165].

Agrega harmanlarını oluşturan daneler boyutlarına göre derecelendirilerek, maksimum dane boyutu ve diğer boyuttaki danelerin ağırlıkça miktarları ilgili şartname limitlerine göre belirlenmektedir. Agregaların maksimum boyutu, malzemenin %100'nün

geçebileceği en küçük elek çapıdır. Nominal maksimum boyut ise agreganın en fazla %90'nın üstünde kalacağı en büyük elek çapıdır. Genel olarak, maksimum dane boyutu arttıkça işlenebilirlik ve sıkışma zorlaşır, yoğunluk ve stabilite artarak karışımdaki bağlayıcı ihtiyacı azalır ayrıca segregasyon artarak boşluk oranı miktarı ve agrega danelerinin yüzey alanı azalmaktadır.

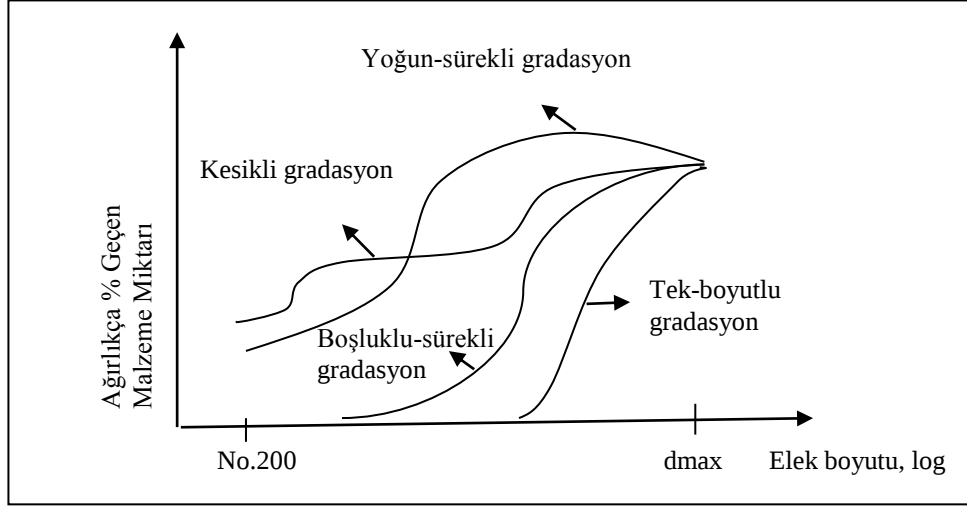
Gradasyon; agrega harmanını oluşturan danelerin boyutlarına göre dağılımını ifade etmektedir. Agregalar gradasyon bakımından; kesikli gradasyon, yoğun-sürekli gradasyon, boşluklu sürekli gradasyon, tek-boyutlu gradasyon olmak üzere 4 gruba ayrılmaktadır (Şekil 2.3).



Şekil 2.3. Agrega gradasyonu dağılımı [175].

- Kesikli gradasyon: Belirli aralıklardaki dane çapı boyutunda agreganın bulunmadığı boşluklu yapıdaki agrega boyutlandırmasıdır. Yol inşaatında genel olarak tercih edilmeyip, beton üretiminde kullanılmaktadır.
- Yoğun-sürekli gradasyon: İyi derecelenmiş maksimum yoğunluk ve minimum boşluğa sahip kabadan inceye kadar değişik boyutlardaki agregaların birbirinin boşluklarını doldurmasıyla oluşan uygun oranlardaki agrega karışım gradasyonudur. Bitümlü sıcak karışım ve betonlarda agrega karışımı olarak kullanılmaktadır.
- Boşluklu-sürekli gradasyon (açık gradasyon): Yapısında ince agrega bulunmayan ve boşluk oranı yüksek agrega karışımıdır. Düşük standartlı yollarda temel tabakası olarak kullanılmaktadır.
- Tek boyutlu (üniform) gradasyon: Çoğunlukla aynı boyuttaki agrega karışımlarının oluşturduğu bir gradasyon tipidir. Sathi kaplama ve yollarda koruyucu örtü olarak özellikle düşük standartlı yollarda uygulama alanları bulunmaktadır [175].

Şekil 2.4'te elek boyutundan ağırlıkça geçen malzeme miktarına göre agrega gradasyon tipleri gösterilmiştir.



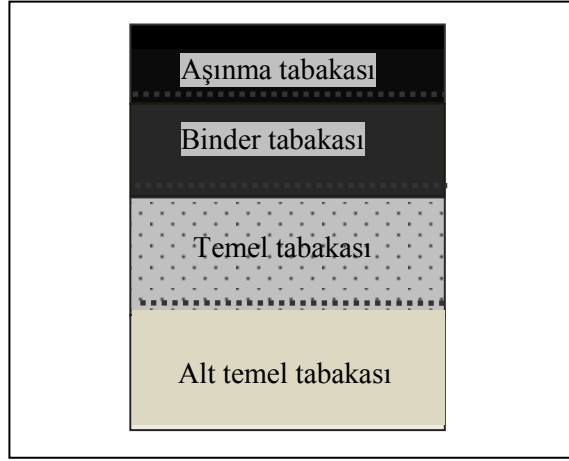
Şekil 2.4. Agrega gradasyon çeşitleri [175].

Esnek kaplamalar içerisinde en yaygın olarak kullanılan sathi kaplamalar ve en yüksek dayanıma sahip olan beton asfalt kaplamalardır. Uygulamada genellikle beton asfalt kaplama kullanıldığından, bu kısımda sadece beton asfalt kaplama açıklanmıştır.

2.2.1.1. Asfalt Betonlu Kaplamalar

Asfalt betonu kaplamalar, temel tabakaları üzerine kaba, ince ve filler malzemesinin belirli bir gradasyon limitleri içinde asfalt çimentosunun (AC) plentte karıştırılarak belirli bir sıcaklıkta finişer ile serilip sıkıştırılmasıyla oluşturulmaktadır [166].

Şekil 2.5'te asfalt betonu kaplamalı esnek üstyapı tipik kesiti gösterilmiştir.



Şekil 2.5. Asfalt betonu üstyapı tabakaları

Aşınma ve binder tabakalarının özellikleri aşağıda ifade edilmiştir.

a) Aşınma Tabakası

Tekerleklerin yol yüzeyi ile temas ettiği son tabakadır. Trafik ve çevre etkilerine doğrudan maruz kaldığından, yapısında kullanılan malzemelerin daha stabil ve durabil olmasına özen gösterilmelidir. Ağır trafikli yollarda kullanılacak agregalarda dayanımı yüksek magmatik kayalardan elde edilen kırma taşların tercih edilmesi, aşınma tabakalarının trafik yüklerinin yarattığı gerilmelere direnç göstermesi bakımından tercih edilmelidir.

Aşınma tabakası gradasyon Karayolları Teknik Şartname (KTŞ) limitleri Tablo 2.1’de verilmiştir.

Tablo 2.1 Aşınma tabakası için gradasyon limitleri [166].

Elek boyu		Tip-1	Tip-2
Mm	İnch		
19	¾	100	-
12,5	½	83-100	100
9,5	3/8	70-90	80-100
4,75	No 4	40-55	55-72
2,00	No 10	25-38	36-53
0,425	No 40	10-20	16-28
0,180	No 80	6-15	8-16
0,075	No 200	4-10	4-10

b) Binder tabakası

Asfalt betonu kaplama tabakasında temel tabakası ile aşınma tabakası arasında yer almaktadır. Aşınma tabakası ile birlikte yol üst yapısının kaplama tabakasını oluşturmaktadır. Aşınma tabakasına taşıtlardan doğrudan gelen teker yüklerini temel tabakasına aktarma ve dayanıma yardımcı olarak tampon görevi görmektedir.

Bitümlü tabakada kullanılan deneysel yöntemler ve uygulama şartları binder ve aşınma tabakaları için de geçerlidir.

Binder tabakası gradasyon limitleri Tablo 2.2 de verilmiştir.

Tablo 2.2. Binder tabakası için gradasyon limitleri [166].

Elek açıklığı		% Geçen
Mm	Inch	
25	1	100
19	$\frac{3}{4}$	80-100
12,5	$\frac{1}{2}$	58-80
9,5	$\frac{3}{8}$	48-70
4,75	No 4	30-52
2,00	No 10	20-40
0,425	No 40	8-22
0,180	No 80	5-14
0,075	No 200	2-7

Asfalt betonu kaplamalarda kullanılan agregalar, dayanıklılık, gerilme ve yorulma direnci, kayma direnci, işlenebilirlik, ısıl değişiklik duyarlılığı, değişmezlik ve nem etkisi ile oluşacak hasarlara karşı dirençli olma gibi özelliklere sahip olmalıdır [167].

Agregalar; kırılmış çakıl, kırmataş ve bunların karışımından oluşmaktadır. Karışım içindeki kırmataş veya kırma çakıl temiz, sert, sağlam ve dayanıklı tanelerden ibaret olup, yapısında bitkisel maddeler, kil toprakları ve diğer zararlı maddeler bulunmamalıdır.

Mineral agregalar; kaba agregası, ince agregası ve mineral filler içeren en az üç ayrı tane grubunun düzgün derecelendirilmiş şekilde, belli oranlarda karıştırılmasından elde edilmektedir [166].

Agregalar boyutlarına göre kaba agregası, ince agregası ve mineral filler olmak üzere üç gruptan oluşmakta ve incelenmektedir.

1) Kaba agrega: Kırmataş, kırma çakıl veya bunların karışımından oluşmaktadır. Agrega karışımının No.4 (4.75mm) elek üzerinde kalan kısmı olup, temiz, pürüzlü, sağlam ve dayanıklı tanelerden oluşmalıdır.

Kaba agregada aranan fiziksel ve mekanik özellikler Tablo 2.3' de verilmiştir.

Tablo 2.3. Kaba agreganın fiziksel ve mekanik özellikleri [166].

Özellikler	Şartname Limitleri		Deney Standartı
	Binder	Aşınma	
Aşınma kaybı (Los Angeles), maksimum %	35	30	TS 3694 (ASTM C-131)
Hava tesirlerine karşı dayanıklılık (donma deneyi, Na ₂ SO ₄ ile) kayıp, maksimum %	12	10	TS 3655 (ASTM C-88)
Kırılmışlık (en az iki yüzü) ağırlıkça, minimum %	100	100	-
Yassılık indeksi, maksimum %	35	30	BS 812
Cilalanma değeri, minimum %	-	50	TS EN 1097-8
Su absorpsiyonu, maksimum %	2,5	2,0	TS 3526 (ASTM C-127)
Soyulma mukavemeti, minimum %	50	50	Ek-A
Kil toprakları ve ufalanabilir taneler, maksimum %	0,5	0,5	ASTM C-142
*Sıkıştırılmış bitümlü karışımların sudan kaynaklanan bozulmalara karşı direnci, indirekt çekme mukavemeti oranı, minimum %	80	80	AASHTO T-283
*Bu deney zorunlu değildir, gerekli görüldüğünde yapılacaktır.			

2) İnce agrega: Kırılmış taş, çakıl veya kum ile bunların karışımlarından oluşup, No.4 (4,75 mm) elek elekten geçip, No.200 (0,075 mm) elek üzerinde kalan malzemelerden oluşmaktadır. İnce agrega temiz, sağlam ve dayanıklı olmalı ve plastisite indeksi %2'den fazla olmamalıdır.

İnce agrega özellikleri Tablo 2.4' te verilmiştir.

Tablo 2.4. İnce agreganın özellikleri [166].

Deney	Şartname Limitleri		Deney Standardı
	Binder	Aşınma	
Plastisite indeksi, maksimum %	2	2	TS 1900
Kil toprakları ve ufalanabilir taneler, maksimum %	0,5	0,5	ASTM C-142
Organik madde miktarı, maksimum %	0-1 (Renk skalası) (0,5)	bulunmayacak	TS 3673 (AASHTO T-194)

3) Mineral filler: Malzemenin tamamı No.40 (0,425 mm) elekten geçip, ağırlıkça en az %70'i No.200 (0,075 mm) elekten geçen malzeme olarak tanımlanır.

Mineral filler; taş tozu, sönmüş kireç, mermer tozu ve benzeri maddelerden oluşmakta, kil, toprak ve organik madde içermemelidir. Mineral fillerin plastisite indeksi %4'ten fazla olmamalı ve içerisinde topraklar içermemelidir. Kaba ve ince agreganın gradasyonunun yetersiz olduğu durumlarda agreganın karışımlarına ilave edilmektedir [166].

Mineral fillerin özellikleri Tablo 2.5' te verilmiştir.

Tablo 2.5. Mineral fillerin gradasyon limitleri [166].

Elek Boyu	Ağırlıkça % Geçen
0.425 mm (No.40)	100
0.075 mm (No.200)	70 – 100

2.2.1.2. Asfalt Betonunun Hazırlanması

Şartname limitlerine göre hazırlanan granülometrik mineral agreganın ve asfalt çimentosu harman tipi veya sürekli karıştırma yapan tipteki plantlerde belirli sıcaklıklarda karıştırılmalıdır. Plantten çıkan karışım üniform olmalı ve serim yerine ulaşınca kadar kıvamını korumalıdır.

Şekil 2.6'da BSK'ların elde edildiği harman tipi plant gösterilmiştir. Karıştırma işleminden önce agreganın ve bitümün Tablo 2.6'daki sıcaklıklara kadar ısıtılmalıdır. Agreganın ve asfalt sıcaklıkları arasındaki fark 20°C'den fazla olmamalıdır.



Şekil 2.6. Bitümlü asfalt karışımların elde edildiği harman tipi plant

Tablo 2.6. Malzemelerin karıştırma sıcaklıkları [166].

Bitümlü Bağlayıcı	Asfalt Çimentosu		Agrega	
	Min. °C	Maks. °C	Min. °C	Maks. °C
40/60, 50/70 penetrasyonlu bitüm ile hazırlanan karışım	145	160	150	165
75/100 penetrasyonlu bitüm ile hazırlanan karışım	140	155	145	160

Plantten çıkan karışım sıcaklıkları ve asfalt betonu serim sıcaklıkları sırasıyla Tablo 2.7 ve Tablo 2.8’de verilmiştir.

Tablo 2.7. Plantten çıkan karışımın sıcaklığı [166].

Hava Sıcaklığı (Gölgede)	Karışım Sıcaklığı (minimum)
5 – 15°C arası için	155°C
15.1 – 30°C arası için	145°C
30°C’den yukarısı için	140°C

Tablo 2.8. Asfalt betonu serim sıcaklıkları [166].

Sıkıştırılmış Tabaka Kalınlığı	< 50 mm	50-75 mm	> 75 mm
Yol Yüzeyi Sıcaklığı (°C)	Minimum Serim Sıcaklığı (°C) ⁽¹⁾		
< 5	(2)	(2)	(2)
5-9.9	(2)	141	135
10-14.9	146	138	132
≥ 15	141	135	130
(1) Finişere boşaltma yapıldığı andaki sıcaklık. (2) Serim yapılmamalıdır.			

Bitümlü sıcak karışımlar plantte hazırladıktan sonra kamyonlarla serim yerine getirilir. Serim yerinde istenilen kalınlık ve eğimde finişerle serim yapılır. Bitümlü sıcak karışım plantten çıktıktan sonra yaklaşık 150°C’lik bir ısıdadır, serim yapılacak yere kadar

taşınması sırasında ısısının bir kısmını kaybeder. Finişere taşınan karışımın serim sırasındaki ısısı 130°C'den az olmamalıdır.

Yol inşaatında gerek üstyapı gerek dolgu imalatlarının her kademesinde sıkıştırma işlemi, kullanılacak yolun ömrü bakımından çok önemli olup, dikkatle uygulanmalıdır.

Karışım tipine bağlı sıcak karışımların sıkıştırma kriterleri Tablo 2.9'da verilmiştir.

Tablo 2.9. Sıcak karışım sıkıştırma kriterleri [166].

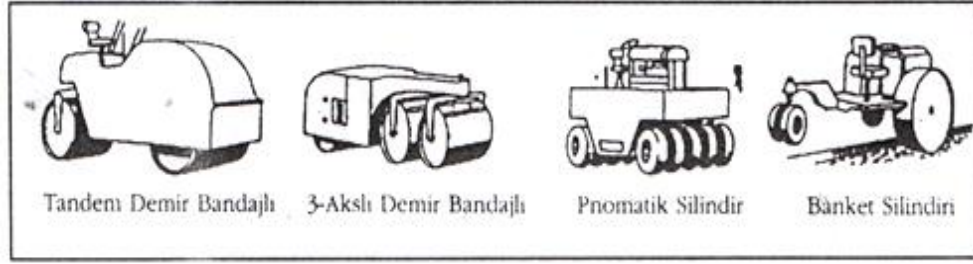
Karışım tipi	İş yeri karışım yoğunluğu (%)	
	Tek Değer	Ortalama değer
Bitümlü temel	96	98
Binder tabakası	96	98
Aşınma tabakası	97	98

İlk silindiraj, finişerle serimin hemen arkasından yapıldığından karışımın ısısı yüksek olur. İlk sıkıştırma dikkatli yapılmadığı takdirde kaplamada düzeltilmesi imkansız bozulmalara yol açabilmektedir. Karışımın bandaja yapışmasını engellemek amacıyla bandaj yeterince ıslak tutulmalıdır.

Ara silindiraj, ilk silindirajdan sonra uygulanan 2,3,4,...ve son silindirajdan önceki tüm pasları kapsar. Ara silindirajda pnömatik silindirler kullanılmakla birlikte kalın tabakalarda vibrasyonlu silindirler kullanılabilir. Ara silindirajda amaç; kılcal çatlakların kapanması, ilk silindirdeki bozulmaları gidermek ve silindir izinin bırakılmamasıdır. Tüm bunların sağlanması için lastik iç basınçlarının devamlı kontrol edilmesi gerekir.

Son silindiraj, sıkıştırmanın son aşaması olup, tüm silindir izleri ve kılcal çatlaklar giderilir. Kaplamada sıkışmalar tamamlandığından ve karışım yeterince soğuduğundan ağır demir bandajlı silindirler kullanılmalıdır [169].

Şekil 2.7'de silindir tipleri ve Şekil 2.8'de BSK karışımların silindirlerle sıkıştırılması gösterilmiştir.



Şekil 2.7. Sıkıştırma makineleri tipleri [170].



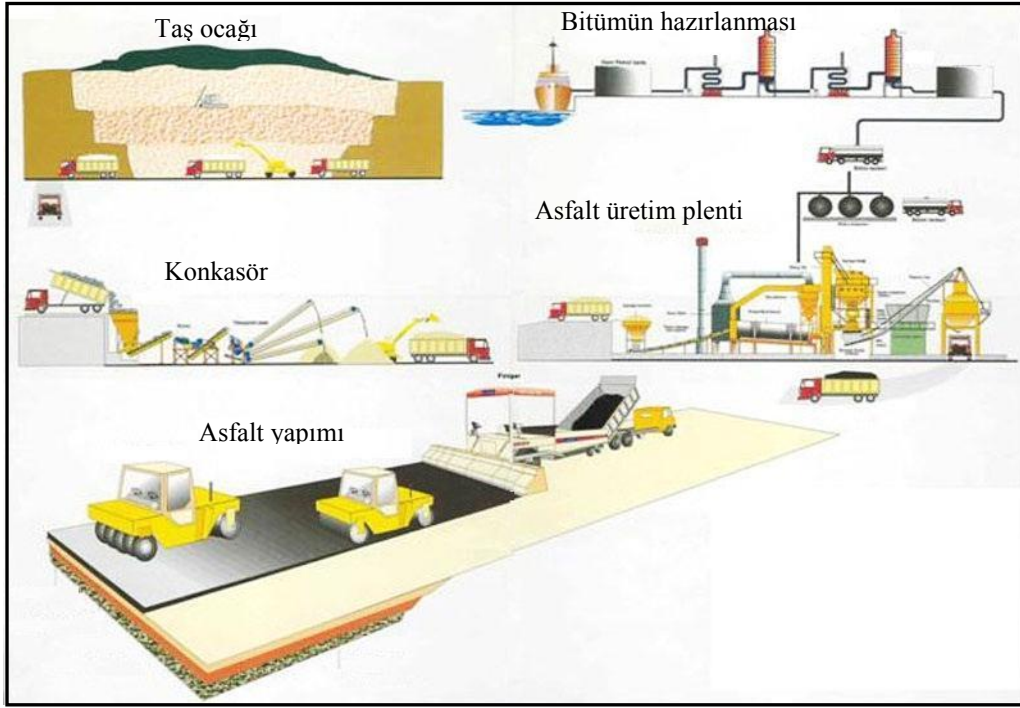
Şekil 2.8. BSK'nın finişerle yola serilmesi ve silindirlerle sıkıştırılması

Aşınma ve binder tabakası sıkıştırma parametreleri Tablo 2.10'da verilmiştir.

Tablo 2.10. Sıkıştırma ve yüzey kalınlık özellikleri [166].

Özellikler	Binder tabakası için	Aşınma tabakası için
Sıkıştırma, işyeri karışım yoğunluğunun %'si		
- Tek değer olarak	96	97
- Ortalama değer olarak	98	98
Sıkıştırılmış tabakanın kalınlık (h) toleransları		
- Tek değer	$\pm 0.1 h$	$\pm 0.1 h$
- Ortalama değer	$h-h+0,1h$	$h-h+0,1h$

Şekil 2.9'da BSK'ların hazırlanma ve uygulama aşamaları gösterilmiştir.



Şekil 2.9. BSK'nın hazırlanması ve uygulanması aşamaları [171].

2.2.2. Temel Tabakaları

Temel tabakası, üst yapıyı oluşturan tabakalardan biri olup, kaplama tabakası ve alt temel tabakası arasında yer alan, granülometrisi, fiziki özellikleri bakımından alt temel tabakasına göre daha iyi olan doğal kum, doğal çakıl veya kırmataş ile az miktarda bağlayıcı ince malzemeden oluşan tabakadır. Kaplama tabakasından gelen trafik yüklerini, alt temel tabakalarına ve taban zeminine kabul edilebilir basınç gerilmesi seviyesine düşürerek ulaştırmakta ve yola belirli bir esneklik sağlayarak kırılmasını önlemektedir. Yol gövdesinde özel önemi olan bu tabakanın başlıca görevi, kaplamadan intikal eden trafik yükünü, alt temel tabakasıyla birlikte taban üzerine yayarak, trafiğin darbe etkisini azaltmaktır. Bu özelliğinden dolayı, yol üst yapısına gelen yüklerin dağılımında önemli rol oynayarak yol üst yapısı tabaka kalınlığının önemli bir kısmını oluşturmaktadır [162,165,172].

Yol üst yapısında kullanılacak temel tabakası tipine göre minimum kalınlıklar Tablo 2.11'de verilmiştir.

Tablo 2.11. Maksimum temel kalınlıkları [166].

Temel Tipi	Maksimum Sıkıştırılmış Kalınlıklar (cm)
Granüler temel	20
Plent-miks temel	20
Çimento bağlayıcılı granüler temel	-
Bitümlü temel	En büyük dane boyutunun 1,5 katından büyük, 3 katından küçük

Tablo 2.12 ve Tablo 2.13'te temel tabakasında kullanılan agrega fiziksel özellikleri Karayolları Teknik Şartnamesi (KTŞ)'de kaba ve ince agrega olmak üzere iki grupta değerlendirilmiştir.

Tablo 2.12. Kaba agrega fiziksel özellikleri [166].

Deney Adı	Şartname Limitleri	Deney Standardı
2 mm elek üzerinde kalan agreganın hava tesirlerine karşı dayanıklılık (donma) deneyinde Na ₂ SO ₄ ile kayıp, maksimum %	15	TS 3655 AASHTO T-104
Aşınma kaybı (Los Angeles), maksimum %	40	TS 3694 AASHTO T-104
Kil topağı ve dağılabilen tane oranı, maksimum %	(4,75 mm elek üstü) 1,0	ASTM C-142
Organik madde, %	Bulunmayacak	AASHTO T-194
Diğer zararlı maddeler, maksimum %	1,0	-

Tablo 2.13. İnce agrega fiziksel özellikleri [166].

Deney Adı	Şartname Limitleri	Deney Standardı
Likit limit, maksimum %	25	TS 1900 AASHTO T-89
Plastisite indeksi, maksimum %	6	TS 1900 AASHTO T-90
Kil topağı ve dağılabilen tane oranı, maksimum %	(4,75 mm elek altı) 1	ASTM C-142
Organik madde, maksimum % Renk skalası	0,5 0-1	AASHTO T-194 TS 3673
Diğer zararlı maddeler, maksimum %	1,0	-

Yolun önemi ve sınıfına göre granüler, plent-miks, çimento bağlayıcılı granüler ve BSK temel tiplerinden biri, temel tabakası olarak seçilir.

a) Granüler Temel Tabakası: Çakıl, kırılmış çakıl, cüruf veya kırma taş malzemenin birlikte veya bir kaçıyla olmak üzere ince malzemenin karıştırılmasıyla oluşturulan temel tabakasıdır. Granüler temel tabakası, KTŞ tariflerine göre hazırlanan malzemenin, agrega gradasyon limitleri dahilinde, optimum su oranında karıştırılarak sıkıştırma işlemi uygulanmasıyla oluşturulur. Aşağıda verilen gradasyon limitleri tablosunda yer alan A, B, C tip malzeme seçimi, kaplama türüne ve kalınlığına göre belirlenir.

Tabaka kalınlığı 20 cm'den az → C tipi granüler temel malzemesi (sathi kaplama)

Tabaka kalınlığı 20 cm veya daha fazla → A,B veya C tipi granüler temel malzemesi

Granüler temel tabakasının, iki veya daha fazla tip malzemenin belli oranlarda karıştırılması ile dizayn edilmesi halinde, malzeme karışımı plentte yapılmalıdır [166].

Tablo 2.14'te granüler temel tabakasına ait gradasyon limitleri verilmiştir.

Tablo 2.14. Granüler temel tabakası gradasyon limitleri [166].

Elek açıklığı		% Geçen		
mm	İnch	A	B	C
50	2	100	-	-
37,5	1 1/2	80-100	100	-
25	1	60-90	70-100	100
19	3/4	--	60-92	75-100
9,5	3/8	30-70	40-75	50-85
4,75	No 4	25-55	30-60	35-65
2,00	No 10	15-40	20-45	25-50
0,425	No 40	8-20	10-25	12-30
0,075	No 200	2-8	0-12	0-12

b) Plent-Miks Temel Tabakası: Kırılmış çakıl, kırılmış cüruf, kırmataş ve ince malzemenin optimum su oranında plentte karıştırılmasıyla elde edilir. Plent – miks temel tabakasında kullanılacak malzemenin KTŞ gradasyon limitleri, Tip - I ve Tip - II olarak adlandırılan kaba ve ince malzeme gradasyonları olup, plentte karışımın en az üç ayrı tane boyutu grubunun uygun oranda bu iki farklı malzeme ile yapılmasını zorunlu kılmıştır. Plent-miks temel malzemesinin serimi soğuk, yağışlı ve don hava şartlarında yapılmamalı, sıcak havalarda yüzey nemlendirilmesi yapılmalıdır. Karışımın serimi finişer ile yapılmalı ve her bir tabaka sıkışmış kalınlığı 20 cm'yi aşmamalıdır [166].

Şekil 2.10'da plent miks temel tabakası yapımı görülmektedir.



Şekil 2.10. Plent-miks temel tabakası yapımı

Plent-miks temel tabakası gradasyon limitleri ile granüler ve plent-miks temel sıkıştırma kriterleri sırasıyla Tablo 2.15 ve Tablo 2.16’da verilmiştir.

Tablo 2.15. Plent-miks temel tabakası gradasyon limitleri [166].

Elek açıklığı		% Geçen	
mm	İnch	Tip - I	Tip - II
37,5	1 1/2	100	-
25	1	72-100	100
19	3/4	60-92	80-100
9,5	3/8	40-75	50-82
4,75	No 4	30-60	35-65
2,00	No 10	20-45	23-50
0,425	No 40	8-25	12-30
0,075	No 200	0-10	2-12

Tablo 2.16. Granüler ve plent – miks temel sıkıştırma kriterleri [166].

Temel Tipi	Granüler	Plent – Miks
Minimum Sıkışma, %	Modifiye Proktor 98 TS 1900 AASHTO T – 180	Modifiye Proktor 100 TS 1900 AASHTO T – 180
	Titreşimli Tokmak 95 TS 1900 BS 1377	Titreşimli Tokmak 97 TS 1900 BS 1377
Optimum Su İçeriği, %	$(W_{opt} - 2) - W_{opt}$ Modifiye Proktor $W_{opt} \pm 2$ Titreşimli Tokmak	$(W_{opt} - 1) - W_{opt}$ Modifiye Proktor $W_{opt} \pm 0,5$ Titreşimli Tokmak

c) Çimento Bağlayıcılı Granüler Temel: Çimento bağlayıcılı granüler temel tabakası; çakıl, kırılmış çakıl, kırılmış cüruf, kırmataş ve ince malzeme kullanılarak KTŞ gradasyon

limitlerine uygun sürekli gradasyon verecek şekilde hazırlanan malzemenin, uygun oranlarda çimento ve su ile bir plentte karıştırılmasıyla hazırlanıp, alt temel tabakası üzerine bir veya birkaç tabaka halinde serilerek sıkıştırılmasıyla oluşan tabakadır. Otoyollarda ve yoğun trafik akımı olan yollarda kullanılmaktadır. Karışım içerisindeki su ve çimento oranları için kesin bir değer önerilmemekte olup, ilk tasarım değerleri olarak çimento oranı %3.5, su oranı ise %6 alınmaktadır.

Çimento bağlayıcılı granüler temel gradasyon limitleri Tablo 2.17’de gösterilmiştir.

Tablo 2.17. Çimento bağlayıcılı granüler temel tabakası gradasyon limitleri [166].

Elek açıklığı		% Geçen
mm	İnch	
37,5	1 1/2	100
25	1	72-100
19	3/4	60-92
9,5	3/8	40-75
4,75	No 4	30-60
2,00	No 10	20-45
0,425	No 40	8-25
0,075	No 200	0-10

Granüler malzeme, çimento ve suyun karışımı harman tipi veya sürekli çalışan plentlerde yapılmaktadır. Briket numuneler 7 gün bekletildikten sonra şartname değeri olan 35-55 kg/cm² serbest basınç dayanımına karşılık 45 kg/cm² değerini sağlayan su-çimento oranları uygulama değeri olarak seçilir. Çimento bağlayıcılı granüler temel tabakasının yola serimi ve karıştırılmasından sonra en az 7 gün kür süresi boyunca yol trafiğe kapalı tutulmalıdır.

d) Bitümlü Temel: Kırılmış ve elenmiş kaba, ince ve mineral filler malzemenin, gradasyon limitleri içinde bitümlü bağlayıcı ile plentte karıştırılarak belirli bir sıcaklıkta finişer ile serilip sıkıştırılmasıyla oluşturulan temel tabakasıdır. Yeteri kadar deneme karışımı yapılmalı ve kullanılan dizayn metodunun ön gördüğü kriterler, deneysel olarak sağlandıktan sonra uygulamaya geçilmelidir. Uygulamada bitümlü bağlayıcı ve agrega karışım sıcaklıklarının belirlenen limitler içinde kalması sağlanmalıdır.

Bitümlü temel tabakası gradasyon limitleri Tablo 2.18’de sunulmuştur.

Tablo 2.18. Bitümlü temel tabakası gradasyon limitleri [166].

Elek açıklığı		% Geçen	
mm	inch	Tip - A	Tip – B
37,5	1 1/2	100	100
25	1	72-100	80-100
19	3/4	60-90	70-90
12,5	1/2	50-78	61-81
9,5	3/8	43-70	55-75
4,75	No 4	30-55	42-62
2,00	No 10	18-42	30-47
0,425	No 40	6-21	15-26
0,180	No 80	2-13	7-17
0,075	No 200	0-7	1-8

2.2.3. Alt Temel Tabakası

Tesviye yüzeyi üzerine serilen ve taban yüzeyi ile temel tabakası arasında yer alan genellikle belli bir granülometrisi olan ve incesi az, kum, çakıl, yüksek fırın cürufu gibi daneli granüler malzemeden oluşan tabakadır. Kaplama ve temel tabakasından gelen trafik yükü etkisini taban zemini üzerine yayılmasında temel tabakasına yardımcı eleman olarak yer almakta ayrıca su ve don tesirlerine karşı tampon bölge vazifesi görmektedir [165,162].

Tablo 2.19’da alt temel malzemesinin fiziksel özellikleri belirtilmiştir.

Tablo 2.19. Alt temel malzemesinin fiziksel özellikleri [166].

2 mm elek üzerinde kalan agreganın hava tesirlerine karşı dayanıklılık (donma) deneyinde Na ₂ So ₄ ile kayıp, maksimum %	20	TS – 3655 AASHTO T-104
Aşınma kaybı (Los Angeles), maksimum %	50	TS – 3694 AASHTO T-96
Likit limit, maksimum %	25	TS – 3655 AASHTO T-89
Plastisite indeksi, maksimum %	6	TS – 1900 AASHTO T-90
Kil topağı ve dağılabilen tane oranı, maksimum %	<u>İri malzeme</u> (4,75 mm elek üstü) 2	<u>İnce malzeme</u> (4,75 mm elek altı) 2
Organik madde %	1	AASHTO T-194

Alt temel malzemesi gradasyon limitleri ve sıkıştırma kriterleri sırasıyla Tablo 2.20 ve Tablo 2.21’de açıklanmıştır.

Tablo 2.20. Alt temel malzemesi gradasyon limitleri [166].

Elek açıklığı (mm)		Tip-A	Tip-B
mm	İnç	% Geçen	% Geçen
75	3	100	
50	2	-	100
37,5	1 1/2	85-100	80-100
25	1	-	60-90
19	3/4	70-100	-
9,5	3/8	45-80	30-70
4,75	No.4	30-75	25-60
2,00	No.10	-	15-40
0,425	No.40	10-25	10-20
0,075	No.200	0-12	0-12

Tablo 2.21. Alt temel sıkıştırma kriterleri [166].

Tip-A	Skışma, minimum %	95	Modifiye Proktor TS 1900, AASHTO T-180
	Optimum su içeriği %	$W_{opt} \pm 2$	
Tip-B	Skışma, minimum %	97	Modifiye Proktor TS 1900, AASHTO T-180
	Optimum su içeriği %	$(W_{opt}-2) - W_{opt}$	

2.2.4. Temel ve Alt temel Tabakalarının Serimi ve Sıkıştırılması

Temel ve alt temel tabakalarının serim ve sıkıştırılmasında aşağıda belirtilen hususlara dikkat edilmelidir.

- Temel tabakalarının sıkışmış kalınlığı 20 cm'yi geçmemelidir. Sıkışma için kullanılan makinelerin kapasitelerinin yüksek olması ve deneysel ölçüm değerlerinin sağlanması kaydıyla tabaka kalınlığı artırılabilir.
- Temel tabakasının birden fazla olması halinde, tabaka kalınlıkları eşit alınmalıdır. Alt tabakanın sıkıştırma işlemi bitmeden bir sonraki tabakanın sıkıştırma işlemine geçilmemelidir.
- Greyderle yapılan serimlerde malzemenin yola üniform dağılması sağlanmalıdır.
- Serme işlemine malzemenin alındığı yere en uzak noktadan başlanmalı, serme işlemi ile sıkıştırma işlemleri arasında en fazla 200 m mesafe bulundurulmalıdır.

- Sıkıştırma işlemleri, statik çizgisel yükü 30 kg/cm²'den büyük düz bandajlı vibrasyonlu silindirler ve/veya lastik başına düşen yükü 3500 kg'dan az olmayan lastik tekerlekli sıkıştırma makineleri ile yapılmalıdır.
- Sıkıştırma yol eksenine paralel ve kenardan başlayıp merkeze doğru yapılmalıdır. Her boyuna sıkıştırmadan sonra ikinci boyuna sıkıştırmaya geçerken bir önceki boyuna sıkıştırmaya en az 10 cm bindirme yapılmalıdır.
- Sıkıştırma sonrası yüzey düzgünlüğü, mastar kullanılarak boyuna ve enine kontrol edilmelidir.
- Sıkışma kontrolleri teknik şartnamelerde kabul gören metotlarla (kum konisi, kasnak, nükleer vb.) yapılmalı ve istenilen sıkışma oranlarının sağlanıp sağlanmadığı kontrol edilmelidir.
- Her tabakanın bitiminde şartnamelerde belirtilen kalite kontrol deneyleri yapılmalı, deney sonuçların istenilen değerleri vermemesi durumunda tasarım ve imalat aşamaları gözden geçirilmelidir.

Tablo 2.22'de temel tabakalarındaki sıkıştırma türlerine göre minimum sıkıştırma yüzdeleri verilmiştir.

Tablo 2.22. Temel tabakaları sıkıştırma kriterleri [166].

Temel tipi	Minimum Sıkışma % si		
	Modifiye Proktor	Titreşimli Tokmak	İşyeri karışım yoğunluğu
Alt Temel	Tip A 95 Tip B 98	-	-
Granüler Temel	98	95	-
Çimento Bağlayıcılı Granüler Temel	98	-	-
Plent-miks Temel	100	97	
Bitümlü Temel	-	-	Tek değer 98 Ortalama değer 96

Sıkıştırma yüzdesi tayininde arazi ve laboratuvar ortamlarında çeşitli deneysel cihazlar kullanılmaktadır. Arazi deneyi olarak nükleer metot deney cihazı sıkıştırma yüzdesi tayininde kullanılan yöntemlerden biridir.

Şekil 2.11’de sıkıştırma yüzdesi tayininde kullanılan troxler nükleer metod cihazı görülmektedir.



Şekil 2.11. Sıkıştırma yüzdesi tayininde kullanılan nükleer metod deney cihazı

3. BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIMLAR

BSK'lar, agregâ, bitümlü bağlayıcı ve hava boşluğundan oluşmaktadır. BSK'nın yapısını oluşturan agregalar; kırılmış ve elenmiş olarak kaba agregâ, ince agregâ ve mineral fillerin belirli gradasyon limitlerinde uygun olarak karıştırılmasıyla elde edilmekte ve asfalt çimentosuyla harmanlanıp, homojen bir şekilde karıştırılmakta ve serilerek sıkıştırılmasıyla, yol üst yapısını oluşturan tabakalardan kaplama tabakası elde edilmektedir [165,173,174].

Esnek kaplamalar, düşük standartlı ve yüksek standartlı kaplamalar şeklinde iki ayrı kalitede imal edilmektedir. Düşük standartlı esnek kaplamalar, günlük ağır taşıt trafiğinin 500'den daha az veya 8.2 ton standart tek dingil yükünün 20 yıldaki tekrür sayısı 2×10^6 dan daha az olduğu, trafik hacminin düşük olduğu, yüzeysel veya koruyucu tabaka olarak yapılan yollarda, ekonomik olarak yeterli performansı sağlamaktadır. Yüksek standartlı karayolları ve otoyolların ise sıcak asfalt karışımlara sahip tabakalar olarak yapılması gerekmekte ve BSK'lar, proje ömrü içinde toplam standart dingil yükü sayısı 3×10^6 dan fazla olan yüksek standartlı yol kaplamalarında kullanılmaktadır [173,175].

3.1. Bitümlü Sıcak Karışımlarda Kullanılan Malzemeler

BSK'da kullanılan bağlayıcı ve agregaların, fiziksel ve mekanik özellikleri bu kısımda sunulmuştur.

3.1.1. Bitümlü Bağlayıcı ve Davranışları

Bitümlü bağlayıcılar; doğal veya hidrokarbon esaslı ya da bunların her ikisinin bir araya gelmesiyle oluşan, metal içermeyen bileşenleri ile birlikte likit, katı, yarı katı halde bulunan ve karbon sülfürde eriyebilen organik kökenli maddelerdir. Hidrokarbonlu bağlayıcılar sıcaklığa bağlı olarak değişik reolojik hallerde bulunduklarından, ısıtma veya özel hazırlama yoluyla sıvı hale getirilerek kullanılmaları mümkündür. Yol kaplamalarında kullanılan bitümlü bağlayıcılar bitkisel kökenli kömürden elde edilen katranlar ve hayvansal kökenli petrolden elde edilen asfaltlar olmak üzere iki ana gruba ayrılmaktadır.

Bitümlü bağlayıcılar sıcak karışımlarda ağırlıkça %5-7, hacimce en fazla %13-15 arasında düşük oranlarda kullanılmasına rağmen agregâ danelerini birbirine bağlayarak,

trafik etkisi altında dağılmasını önlemekte, kohezyon ile karışımın stabilitesini arttırmakta, düzgün yüzeyler sağlayarak sürüş konforu sağlamakta ve karışım boşluklarını doldurarak geçirimsizliği sağlamak gibi özelliklere sahiptir [165,176].

Sıcak asfalt karışımlarında asfalt çimentosu (AC) yarı katı halde kullanılarak, yollarda yüzey işlemlerinde, yüzeyde oluşan çatlakların doldurulmasında kullanılmaktadır. Asfalt çimentosu, viskoz bir malzeme olup, karışımlarda agrega danelerine hızlı bir şekilde yapışan ve agrega danelerini birbirine kenetleyen bağlayıcı maddedir. Genellikle su geçirmezler ve çoğu asit, alkaliler ve tuzlardan etkilenmemektedir. Isındıklarında veya yaşlandıklarında değişime uğrarlar [177,178].

Depolama tankları veya ısıtma tanklarında ısıtılarak asfalt çimentosu, petrol çözücülerle eritilerek katbek asfaltı ve su ile birleşerek asfalt emülsiyonları gibi değişik hallerde kullanılabilirler [178].

Bitümlerin kıvamları, TS 1081 EN 12591 standardındaki penetrasyon veya viskozite değerlerine göre Tablo 3.1’de belirtildiği gibi sınıflandırılır.

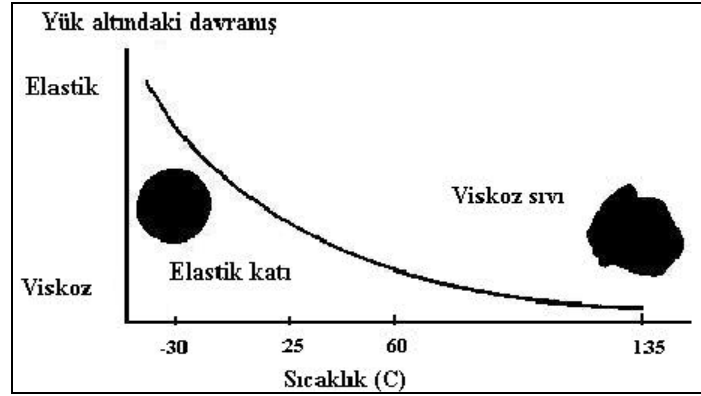
Tablo 3.1. Asfalt çimentolarının sınıflandırılması [166].

Bitüm sınıfları	Penetrasyon Sınıfı		Dinamik vizkozite	Kinematik vizkozite	
	25 °C	15 °C		135°C’de, en az	60 °C’de
B 20/30	20-30				
B 30/45	30-45				
B 35/50	35-50				
B 40/60	40-60				
B 50/70	50-70				
B 70/100	70-100				
B 100/150	100-150				
B 160/220	160-220				
B 250/330	250-330	70-130	18	100	
B 330/440		90-170	12	85	
B 500/650		140-260	7,0	65	
B 650/900		180-360	4,5	50	
V 1500					1000-2000
V 3000					2000-4000
V 6000					4000-8000
V 12000					8000-16000

Türkiye’de iklim koşulları açısından BSK esnek yol kaplamalarında en yaygın kullanılan asfalt tipleri B 40/50, B 50/70 ve B 70/100 penetrasyonlu bitümlerdir. Ancak sıcak iklimli bölgelerde ve ağır trafik hacminin yoğun olduğu yollar için B 50/70 penetrasyonlu bitüm kullanılması daha uygun olabilir [166,176].

Asfalt karışım performansında asfalt bağlayıcıların karakteristikleri önemlidir. Bunlar sıcaklığa karşı hassaslık, visko-elastik yapı ve yaşlanmadır. Ayrıca asfalt çimentosunun davranışı yükleme zamanına bağlıdır. Asfalt daha kısa bir yükleme zamanı altında katılaşır, sertleşmektedir [179].

Şekil 3.1’de asfaltın sıcaklık değişimi ve yük altındaki davranışı gösterilmiştir.

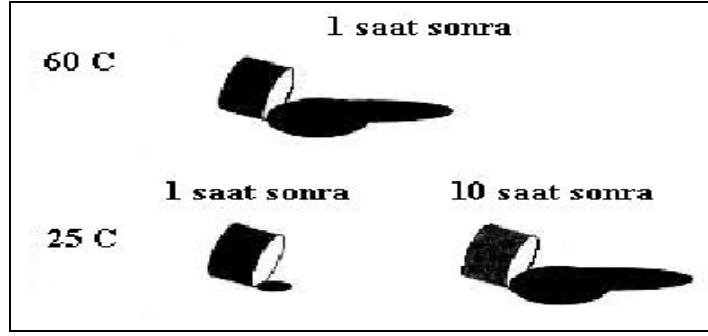


Şekil 3.1. Asfaltın sıcaklığa göre yük altındaki davranışı [180].

Asfalt çimentosunun bağımlılığı birbirini yerine geçebilen yükleme süresi ve sıcaklığa göre davranış gösterir. Düşük yükleme oranları, yüksek sıcaklık ile ve hızlı yükleme oranları düşük sıcaklık tarafından simüle edilir.

Asfalt çimentosu, hem viskoz hem de elastik karakteristiklerini eş zamanlı olarak gösterdiği için visko-elastik bir malzemedir. Yüksek sıcaklıklarda özellikle 100°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda asfalt çimentosu hemen hemen viskoz akıcı davranır. 0°C'nin altındaki düşük sıcaklıklarda asfalt çimentosu çoğu zaman yüklendiği veya yüklenmediği zaman şekil değiştirmesi elastik katı gibi davranır [179].

Şekil 3.2’de visko-elastik bir malzeme olan asfalt çimentosunun sıcaklık ve yükleme zamanı ilişkisi davranışı görülmektedir.



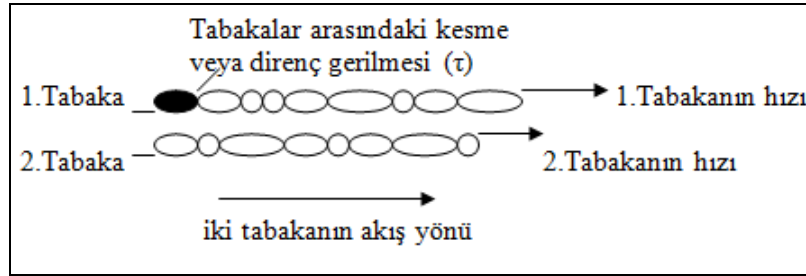
Şekil 3.2. Asfaltın zaman ve sıcaklığa göre davranışı [181,182].

3.1.1.1. Bitümün Yüksek Sıcaklık Davranışı

Sıcak havada ya da yavaş araç trafiğinde (park alanları) asfalt çimentosu viskoz davranır. Viskozite, fiziksel bir özelliktir ve sıvının akmaya karşı dayanımını ifade eder.

Sıcak asfalt viskoz sıvılar bazen plastik diye isimlendirilir. Çünkü; akmaya başlar ve sonra ilk durumlarına dönmezler. Bu durum sıcak havalarda sıcak karışım asfalt kaplamaların daha az stabil olmasını sağlar ve tekrarlanan yükler altında teker altında oturmalar oluşturur [181].

Asfaltın sıvı akış özelliklerinin mikroskopik görünüşü Şekil 3.3'teki gibidir.



Şekil 3.3. Sıvı akış özelliklerinin mikroskopik görünüşü [181].

3.1.1.2. Bitümün Düşük Sıcaklık Davranışı

Soğuk havalarda ya da hızlı araç trafiğinde asfalt çimentosu elastik malzeme gibi davranır. Örneğin, elastik malzeme lastik yüklendiğinde deforme olur. Yük kalkınca eski şekline döner. Eğer yük malzemenin dayanımından fazla gerilme oluşturursa elastik malzeme kırılabilir. Asfalt çimentosu, düşük sıcaklıklarda rijit davrandığından çok kırılğan

olur ve aşırı yüklerde çatlar. Bu nedenle soğuk havalarda asfalt kaplamada düşük sıcaklık çatlakları oluşur [181].

3.1.1.3. Bitümün Normal Sıcaklık Davranışı

Çevre koşulları çoğu aşırı sıcaklar ile aşırı soğuklar arasındadır. Bu tür iklime sahip bölgelerde asfalt, hem kıvamlı sıvı hem de elastik katı özellikler sergiler. Asfalt ısıtıldığında, düzgün ve boşluğu az bir yüzey elde edilebilecek şekilde karıştırmaya, agrega yüzeyinin bitümle kaplanmasına ve sıkıştırmaya imkan tanıyan bir kayganlaştırıcı gibi davranır. Soğuduğunda ise agregayı bir arada tutan bir yapıştırıcı gibidir. Bu nedenle asfaltın davranışı visko-elastik olarak değerlendirilir. Yani sıcaklık ve yük/yükleme hızına bağlı olarak hem elastik hem de viskoz özellik taşır [180,182,183].

3.1.1.4. Bitümün Yaşlanma Davranışı

Kaplama sistemlerinin çoğu orta sıcaklıklarda bulunur. Asfalt çimentosu hem akıcı hem de elastik katı bir karakteristiğe sahiptir. Asfalt bir organik malzeme olduğu için çevreden oksijen ile reaksiyona girer. Oksidasyon asfalt moleküllerinin yapı ve karmaşık özelliğini değiştirir. Oksidasyon asfaltta oksitlenme, yaşlanma veya sertleşmeye yol açarak daha fazla kırılmaların oluşmasına neden olur. Oksidasyon daha yüksek sıcaklıklarda daha hızlı bir şekilde meydana gelir. Asfalt çimentosu ısıtılıp, daha kolay karıştırılıp, sıkıştırıldığı zaman miktar olarak önemli ölçüde kırılmalar meydana gelir.

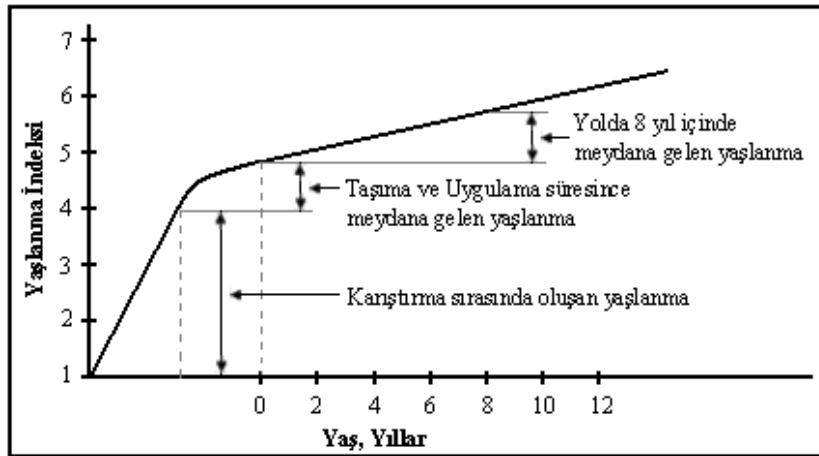
Sıcaklık değişimleri ve yüklem oranları altında asfalt çimentosunun karakteristikleri ve yaşlanma aşamaları kaplama sistemleri içinde bir bağlayıcı olarak performans özellikleri tespit edilir [179].

Kaplama bünyesindeki asfalt çimentosunun; servis ömrü boyunca ısının, havanın ve çevresel koşulların etkisinde sertleşmeye uğradığı, zamanla asfalt çimentosunun viskozitesinde artış oluşturan ve oksidasyon sonucu değişiminin yaşlanma sertleşmesi olarak adlandırıldığı, yaşlanma sertleşmesine uğrayan asfalt çimentosunun daha düşük penetrasyon ve daha yüksek viskozite gösterdiği, yaşlanma sertleşmesinin gevrek kırılma ile daha düşük adezyon ortaya koyduğu ifade edilmektedir [184].

Bitümlü bağlayıcıların özelliğini azaltan faktörler ile BSK karışımların yıllara göre yaşlanma indeksi sırasıyla Tablo 3.2 ve Şekil 3.4'te gösterilmiştir.

Tablo 3.2. Bitümlü bağlayıcı özelliğini azaltan faktörler [185].

Yaşlanmaya Neden Olan Etkiler	Meydana Geliş Sebebi					Meydana Geldiği Yer	
	Süre	Sıcaklık	Oksijen	Güneş Işığı	Beta Gama Işığı	Yüzeyde	Kütlede
Oksidasyon	X	X	X	–	–	X	–
Fotooksidasyon (Direkt ışık)	X	X	X	X	–	X	–
Volatilazasyon (Buharlaşma)	X	X	–	–	–	X	X
Foto oksidasyon (Yansıyan Işık)	X	X	X	X	–	X	–
Foto Kimyasal (Direkt Işık)	X	X	–	X	–	X	–
Foto Kimyasal (Yansıyan Işık)	X	X	–	X	–	X	X
Polimerizasyon (Polimerleşme)	X	X	–	–	–	X	X
Yapı İçerisinde Gerçekleşen Yaşlanma (Tiksotropi)	X	–	–	–	–	X	X
Yağ Yayılması (Sineresis)	X	X	–	–	–	X	–
Nükleer Enerji ile Değişim	X	X	–	–	X	X	X
Suyun Etkisi	X	X	X	X	–	X	–
Agrega Tarafından Absorbe Edilme	X	X	–	–	–	X	X
Agrega Yüzeyinde Bileşenlerin Absorbe Edilmesi	X	X	–	–	–	X	–
Ara Yüzeydeki Kimyasal Reaksiyon (Katalitik Etki)	X	X	–	–	–	X	X
Mikrobiyolojik Etkiler	X	X	X	–	–	X	X



Şekil 3.4. BSK'ların yıllara göre yaşlanma indeksi [170,186].

3.1.2. Agregalar

Asfalt karışımların performansı üzerinde önemli bir rolü olan agregalar, BSK'ların en önemli malzemelerinden biridir. Agregalar elde edilme yöntemlerine bağlı olarak değişik boyutlarda kırılmış, kırılmamış agregalar ve bunların karışımlarından oluşan doğal, yapay ve geri kazanılmış agrega olarak 3'e ayrılmaktadır. Karışımın hacimce %75 ile %85'ini, ağırlıkça %90 ile %95'ini, oluşturan mineral agregalar, kaba agrega, ince agrega ve mineral filler içeren en az üç değişik boyuttaki dane grubunun belirli oranlarında karıştırılmasından elde edilmektedir. Mineral agregalar, kaplamanın yük taşıma kapasitesini büyük ölçüde karşılayarak asfalt kaplamanın performansı üzerinde önemli rol oynamaktadır [166,176,187,188,203].

Esnek üstyapılarda kullanılacak agregaların, bitümle iyi bir aderans sağlayarak trafiğin tekrarlı statik ve dinamik yüklerine, farklı hava koşulları gibi çevre ve dış etkenlere karşı dirençli olma özelliğine sahip olması gerekir [189].

Agregalar fiziksel özellikleri bakımından; mineralojik, boyut, gradasyon, biçim, yüzey yapısı, porozite, yüzey alanı ve boşluk oranı, özgül ağırlık olarak sınıflandırılmaktadırlar.

3.1.2.1. Agregaların Mineralojik Sınıflandırması

Agregalar mineralojik özellikleri bakımından dere malzemesi, kırma taş ve yapay taşlar olarak elde edilmektedir. Dere malzemeleri yüksek işlenebilirliği ve suya ihtiyacının az olmasından dolayı alt temel hariç yol kaplamalarında pek kullanılmaz iken betonarme yapılarda su, çimento ile karıştırılarak yapı betonları olarak uygulanarak, daha çok tercih edilmektedirler. Dere malzemeleri yollarda daha çok konkasörlerde kırılarak kırma taş çakıl ve kum olarak kullanılmaktadır. Yapay taşlar daha çok yüksek fırın cürufılarından elde edilmektedir. Yapısı itibarıyla poroz ve gevrek bir yapıya sahip olup, yüksek ısıya sahip fırınlarda demirin eritilmesi işleminde bir yan ürün olarak sağlanmaktadır.

Ülkemizde genellikle betonun hammaddelerinden olan ve bağlayıcı olarak kullanılan çimentonun yapısında kullanılmakta yollarda pek yaygın olarak uygulama sahası bulunmamaktadır. Yol kaplamalarında daha çok tercih edilen ve yaygın kullanım sahası olan agregalar ise kayaların kırılması sonucu elde edilen mineral agregalardır [176].

3.1.2.2. Agregaların Boyut Sınıflandırması

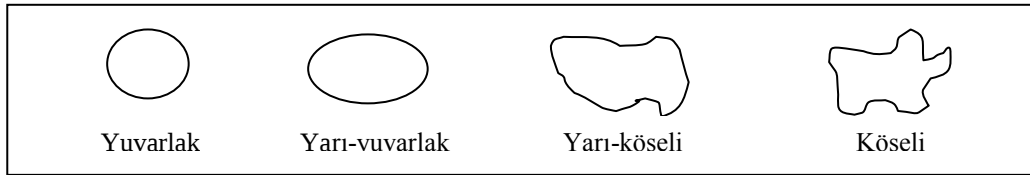
Agregalar dane çapı büyüklüklerine göre sınıflandırılmaktadır. Boyut sınıflandırmasına göre agregalar kaba, ince ve filler olmak üzere 3 gruba ayrılmaktadır. Agregalar belirli elek seti seçilerek dane boyu dağılım grafiği elde edilerek gruplara ayrılmaktadır.

- a) Kaba agregalar: Dane boyutu bakımından No:4 (4.76 mm) eleğin üzerinde kalan kısımlardır.
- b) İnce agrega: No:4 elekten geçen ve No:200 elek (0.075 mm) üzerinde kalan agregalardır.
- c) Filler: No:200 elekten geçen agreganın en az %70'i, No:200 elekten geçen mineral taş tozu ve taş unu olarak elde edilen agregalardır.

3.1.2.3. Agregaların Biçim Sınıflandırması

Agrega daneleri iki boyutlu ve üç boyutlu olarak şekillerine göre sınıflandırılmaktadır. Yol kaplamalarını oluşturan karışımlarda kullanılan agregalar karışımların birçok özelliklerine etki etmektedir. Agregada daneleri iki boyutlu olarak yuvarlak, yarı-yuvarlak, yarı açısallı (yarı köşeli), açısallı (köşeli) olarak sınıflandırılmaktadır.

Agregaların iki boyutlu dane biçim sınıflandırması Şekil 3.5'te karşılaştırılmıştır.

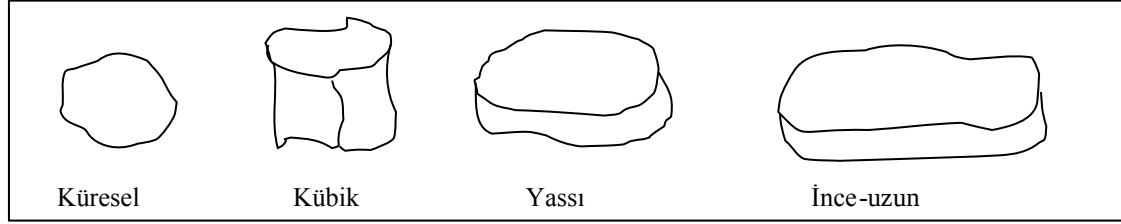


Şekil 3.5. Agregaların iki boyutlu dane biçim sınıflandırması [176].

İşlenebilirlik özelliği olarak yuvarlak biçimli agregalar köşeli agregalara göre daha yüksek olup, deformasyonlara gösterilen direnç bakımından köşeli olanlar yuvarlak biçimli agregalara göre daha dayanımlıdır. Bu özellik bakımından yuvarlak biçimli olanlar kolay sıkışabilmesi ve işlenebilirliğinin yüksek olması nedeniyle beton yapımında, köşeli olanlar ise sıkıştırdıktan sonra yüksek stabilite özelliği gösterdiğinden dolayı yol yapım malzemesi olarak tercih edilmektedir.

Üç boyutlu biçim sınıflandırması bakımından agregalar küresel, kübik, yassı, ince-uzun olarak sınıflandırılmaktadır. Yassı ve ince uzun özellikli agregalar işlenebilirlik ve stabilite özelliğini azalttığından beton ve yol yapım malzemesi olarak kullanılmamaktadır [176].

Şekil 3.6’da agregaların üç boyutlu dane biçim sınıflandırması yapılmıştır.



Şekil 3.6. Agregaların üç boyutlu dane biçim sınıflandırması [176].

3.1.2.4. Agregaların Boşluk ve Yüzey Alanı Sınıflandırması

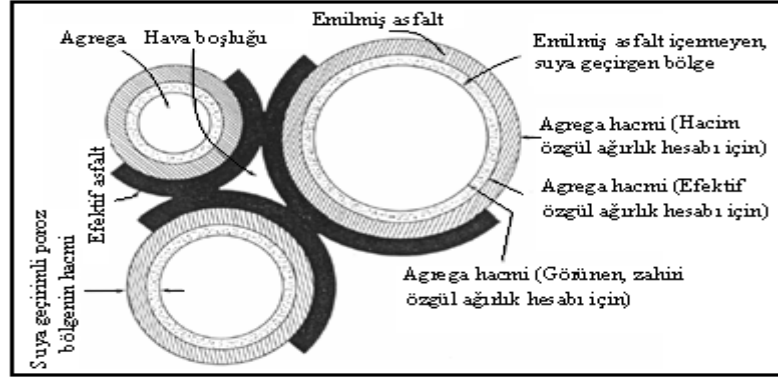
Agregalar yüzey alanı ve karışımı oluşturan agregadananeleri arasındaki boşluk oranı bakımından önem arz etmektedir. Agregadanane ile hazırlanan beton, asfalt betonu, alt temel ve temel tabakası gibi tüm karışımların stabilitesinin, işlenebilirliğinin yüksek, boşluk oranının düşük ve kullanılan bağlayıcı miktarının en optimum düzeyde olması istenmekte dolayısıyla agregadanane gradasyonunda sürekliliğin sağlanması gerekmektedir. Bu bakımdan agregaların yüzey alanları ve karışımındaki agregalar arasındaki boşluk oranları toplamı karışımların özelliklerine doğrudan etki etmektedir. Agregaların maksimum dane çapı artarsa işlenebilirlik azalmakta, karışım yoğunluğu artmakta bu yüzden bağlayıcı miktarı azalarak karışımın stabilite, kohezyon ve dayanımı azalmaktadır. Bu özelliklerinden dolayı esnek kaplamayı oluşturan tabakalar bakımından üst tabakalarda ince alt tabakalarda ise daha kaba gradasyonlu agregalar kullanılarak şartnamelerin öngördüğü karışım özellikleri sağlanmaktadır [176].

3.1.2.5. Agregaların Özgül Ağırlık Sınıflandırması

Agregalar özgül ağırlık olarak zahiri özgül ağırlık, hacim özgül ağırlık ve doymun yüzey özgül ağırlık olmak üzere 3 farklı özgül ağırlığa sahiptir. Karışımı oluşturan agregaların

özgül ağırlığı laboratuvar deneylerinden tespit edilerek karışım hesaplamaları yapılırken bu parametrelerden faydalanılmaktadır.

Şekil 3.7’de özgül ağırlık hesaplamalarındaki agrega hacim bölgeleri gösterilmiştir.



Şekil 3.7. Agreganın özgül ağırlık hesaplamalarında dikkate alınan hacimleri [190].

3.1.2.6. Agregaların Porozite Sınıflandırması

Porozite, agrega danelerinin sahip olduğu toplam boşlukların hacminin, agrega danesi hacmine oranı olup, absorpsiyon oranına etki etmektedir. Agrega danelerinin su emmeye sahip boşlukların miktarının sıcak asfalt karışımlarda %0.5-1.5 arasında olması istenmekte diğer tabakalarda ise dona karşı duyarlılığın sağlanması için porozitenin fazla olmaması istenmektedir. Yeterli derecede poroziteye sahip agrega daneleri bitüm emilmesini sağlayacağından agrega ile bağlayıcı arasında adezyonun ve suyun etkisiyle oluşacak soyulmaya karşı direncin artmasına yol açmaktadır. Aşırı poroz yapıya sahip agregalarda ise özgül ağırlıklarının az olması ve boşlukların fazla olması nedeniyle daha fazla asfalt kullanılması gerekmekte bu durum sıcak havalarda terleme ve kuma problemlerini meydana getirmektedir. Ayrıca poroz agregalarda yoğunluk ve kütleli stabilite değerleri düşük olduğundan dolayı sıcak asfalt karışımlarda hem aşırı poroz agregaların hem de poroz olmayan agregaların kullanılmaması gerekmektedir [175,176].

Agregaların porozluklarına göre sınıflandırması Şekil 3.8’deki biçimdedir.



Şekil 3.8. Poroz sınıflandırması [175].

3.1.2.7. Agregaların Yüzey Yapısı Sınıflandırması

Agrega daneleri pürüzlülük ve cilalık yüzey yapılarına göre sınıflandırılmaktadır. Agregaların dere malzemesi gibi cilalı olanları işlenebilirliği arttırdığından beton yapımında kullanılmakta, kırma taş agregalarının kullanıldığı pürüzlü yüzeylere sahip olanlar ise asfalt betonu kaplamalarında stabiliteyi arttırdığından dolayı tercih edilmektedir. Agregada danelerinin fazla pürüzlülüğü içsel sürtünme açısı, stabilite, kayma mukavemeti, asfalt filmi ile adezyon özelliğini artırıp, işlenebilirliği azaltmakta ancak agregaların boşluk hacmi sıkışmaya karşı direnç, lastik aşınması artışı ve degradasyon gibi olumsuz özelliklere yol açmaktadır. Bu bakımdan agregalardan beklenen özellikleri sağlanması için yüzey pürüzlülüğü önem arz etmektedir [175,176].

Şekil 3.9’da agregaların pürüzlülüklerine göre sınıflandırması yapılmıştır.



Şekil 3.9. Agregaların pürüzlülük sınıflandırması [176].

4. ASFALT BETONU KAPLAMALARDA ARANAN ÖZELLİKLER VE MEYDANA GELEN BOZULMALAR

4.1. Asfalt Betonu Kaplamalarda Aranılan Özellikler

Sıcak asfalt karışımların uygulandığı aşınma, binder gibi kaplama tabakaları ile bitümlü temel tabakalarında kullanılan agrega ile asfalt malzemelerin fiziksel ve mekanik özelliklerinin, teknik şartnamelerde belirtilen ilgili koşulları sağlaması gerekmektedir. Karışımların tasarımı yapılırken aşağıda belirtilen özellikler dikkate alınmalıdır.

- Stabilite
- Durabilite (Dayanıklılık)
- Rijitlik
- Fleksibilite (Esneklik)
- Kaymaya karşı direnç
- Yorulmaya Karşı Direnç
- İşlenebilirlik
- Geçirimsizlik

4.1.1. Stabilite

Yol kaplamalarında trafik yükleri, ötelenme ve tekerlek izlerinden kaynaklanan deformasyonlara karşı direnç, yolun stabilitesi tarafından sağlanmaktadır. Stabilite, trafik yüklerinden dolayı oluşan deformasyonları karşılayacak şekilde olmalıdır. Ancak düşük stabilite deformasyonlara neden olurken yüksek stabilite karışımlarda esneklik götürmeyip, çatlamalara neden olmaktadır.

Stabilite, agregalar arasındaki içsel sürtünme ile bitüm-agrega kohezyonuna bağlıdır. Agregalar arası içsel sürtünme, agrega danesinin şekli ve yüzey yapısı, kohezyon ise asfaltın yapışma özelliği ile ilgilidir. Sıcak asfalt karışımların stabilitesine kayma mukavemeti, ısı ve eylemsizlik direnci etki etmektedir.

Karışımın kayma mukavemeti; agrega daneleri arasındaki içsel sürtünme ile agrega-asfalt arasındaki bağ kuvvetlerinin neden olduğu kohezyondan kaynaklanmaktadır. İçsel sürtünmeden agrega, kohezyondan ise asfalt sorumludur. İçsel sürtünme açısının büyük

olması durumunda deformasyon direnci büyük olmaktadır. Düşük ısı ve hızlı yüklemelerde kohezyonun etkisi büyüktür.

Isının stabilite üzerindeki etkisi; ısının artmasına bağlı olarak agreganın asfalt absorpsiyonu arttığından agrega-asfalt adezyonunu artarak karışımın stabilitesi artmaktadır. Asfaltın viskozluğu düşerek karışımın sıkışmaya karşı direnci azalmakta daha kolay sıkışma olacağından karışım yoğunluğu artarak daha yüksek stabilite elde edilmektedir. Ayrıca ısı arttıkça karışım kohezyonu azalarak stabilite düşmektedir.

Eylemsizlik direnci ise asfalt karışımın trafik yüklerinden kaynaklanan yer değiştirmelere karşı direncidir. Yükleme hızı, kaplama kalınlığı arttıkça ve yükün miktarı azaldıkça eylemsizlik direnci artmaktadır [173,175,176].

Düşük stabilitenin yol açtığı etkiler ve sebepleri Tablo 4.1’de sunulmuştur.

Tablo 4.1. Düşük stabilite ve etkileri [173].

Düşük stabilite	
Sebeup	Etki
Yuvarlak, kırılmamış veya az kırılmış agrega yüzeyi	Tekerlek izinde oturma
Karışımında fazla kum yüzdesi	Yol yapımı ve sonrasında yumuşaklık, sıkışma zorluğu
Karışımında fazla asfalt yüzdesi	Kusma, oturma ve oluklaşma

4.1.2. Durabilite (Dayanıklılık)

Trafik, hava, su ve sıcaklık gibi çevre etkilerine karşı asfalt betonu kaplamaların gösterdiği direnç dayanıklılık olarak adlandırılmaktadır. Dayanıklılık genel olarak düşük penetrasyonlu asfalt, kalın film tabakası, yüksek asfalt oranı, yüksek soyulma direnci, iyi sıkışma ve yoğun gradasyon ile artış göstermektedir. Karışımın aşınma ve şişmeye karşı direnç göstermesi, yapısındaki agreganın aşınma ve şişme karakteristiklerine bağlıdır. Aşınma tabakalarında daha yüksek dayanıklılık elde etmek için daha sert agrega kullanılmaktadır. Ayrıca BSK’ların aşınması, asfaltın sertleşmesi ile hızlanmakta, asfaltın sertleşmesi ile soyulmalar ve çatlaklar artmaktadır. Karışım içindeki asfalt miktarının azalmasıyla agregalar arasındaki bağ kuvveti azalacağından, trafik etkisiyle agregalardan kopmalar oluşarak, kaplama bozulmaları meydana gelmektedir. Dayanıklılığı etki eden faktörlerden biri de nemdir. Karışımın nem durumunda soyulmaya karşı direnci, agreganın asfalt absorpsiyonu ile ilgilidir. Asfaltın oksitlenmeye karşı direncinde ise yaşlanma

karakteristikleri ve karışımdaki boşluk oranı önemli etkindir. Oksitlenmenin artması sırasında penetrasyon düşerek kaplama kırılgan bir hal almaktadır [165,176].

Tablo 4.2’de durabilitenin düşük olmasına yol açan sebepler ve etkileri karşılaştırılmıştır.

Tablo 4.2. Düşük durabilite sebep ve etkileri [173].

Düşük durabilite	
Sebepler	Etkiler
Soyulmaya karşı hassas agrega kullanımı	Agrega sökülmesi ve asfalt soyulması
Düşük asfalt yüzdesi	Kuru bir görünüş, agregaların sökülmesi
Dizayn hatasına bağlı yüksek boşluk oranı ve yetersiz uygulama sıkıştırması	Asfaltın erken yaşlanarak kırılma ve ayrışmaların oluşması

4.1.3. Rijitlik

Sıcak asfalt karışımlar, termoplastik ve viskoelastik malzemeler olup değişik reolojik hallerde bulunduğundan, mekanik özelliklerini belirlemede rijitlik modülü kullanılmaktadır. Rijitlik, sıcak asfalt karışımların yükleme süresi ve hızında, ısı etkisi altında gerilme ile deformasyon arasındaki ilişkinin ifadesidir. Rijitlik, genel olarak asfaltın penetrasyonunun azalması, karışımın yoğunluğunun artması, ısının azalması, yükleme süresinin azalması ve yükleme hızının artmasıyla artış göstermektedir [175].

4.1.4. Esneklik

Esneklik, yol üst yapısını oluşturan alt temel ve temel tabakalarında oluşan oturmalara karşı asfalt betonu kaplamalarının çatlamadan eğilebilme yeteneği gösterebilmesidir. Esneklikteki yetersizlik yol yüzeyinde çatlamalara neden olmaktadır. Mineral filler ve asfalt oranı, asfalt çimentosu kıvamı, sıcağa karşı duyarlılık ve düktilite esnekliğe etki etmektedir. Genel olarak bir asfalt kaplama karışımının esnekliği, açık gradasyonlu agrega ve yüksek asfalt içeriği ile geliştirilmektedir. Esnek bir BSK elde edebilmek için yazın kıvamını koruyup, kışın ise kırılgan hale gelmeyen hava, trafik gibi çevre etkisiyle yorulmaya dayanıklı bir bağlayıcıyla sağlanılabilir [165,194].

4.1.5. Kaymaya Karşı Direnç

Asfalt kaplama karışımlarının özellikle ıslak halde iken kaymaya karşı gösterdikleri tepkiye kaymaya karşı direnç denilmektedir. Yüksek stabilite elde etmek için gerekli olan faktörler, yüksek kayma direnci sağlanması için de geçerlidir. Uygun asfalt içerikli ve pürüzlü yüzey dokusuna sahip agregalar, yüksek kayma direncine katkıda bulunan ana faktörlerdir. Cilalanmaya eğilimli olan agregalar ise aşınma tabakasında kullanılmayıp daha alt tabakalarda kullanılmaktadır. Farklı aşınma veya cilalanma özelliklerine sahip ve yapısında cilalanmaya karşı dirençli malzeme içeren agregalar, kaymaya karşı daha dayanımlı bir yüzey ve kaplama dokusu sağlamaktadır.

Sıkıştırılmış kaplama içindeki boşlukları dolduracak derecede asfaltça zengin olan karışımlarda, kuma meydana gelmesi muhtemeldir. Yol yüzeyinde kalın asfalt tabakası, kaplamanın yaş olması durumunda, kayma direncinin yetersizliğinden dolayı tercih edilmemektedir [194].

Tablo 4.3'te düşük kayma direnci sebepleri ve yol açtığı etkiler açıklanmıştır.

Tablo 4.3. Düşük kayma direnci sebep ve etkileri [173].

Düşük kayma direnci	
Sebepe	Etki
Fazla asfalt yüzdesi	Kuma, düşük kayma direnci
Agrega gradasyonunun kötü olması	Düzgün yüzeyli kaplama, yüzey suyu drenajı olmaması
Agrega cilalanma değerinin düşük olması	Düşük kayma direnci

4.1.6. Yorulmaya Karşı Direnç

BSK'ların yorulma mukavemeti, tekrar eden yükler etkisinde kaplamada çatlama olmadan eğilmeye, kalıcı olmayan deformasyonlara müsaade etme yeteneği olup, kaplamanın sahip olduğu çekme mukavemetinin altında etkiyen trafik yüklerinin, maksimum tekrar sayısına tekabül eden mukavemet değeridir. Yorulma mukavemeti; rijitliğin artması, kaplama kalınlığının artması, eğilme gerilmesinin azalması, asfalt miktarının artması, gradasyon ve yoğunluğun artması ve asfalt penetrasyonunun artması durumunda artış göstermektedir. BSK'ların diğer mekanik özelliklerinde olduğu gibi,

kaplamaların yeterli sıkışması, yorulma mukavemetini artıran önemli parametrelerden biridir [176].

Zayıf yorulma direncinin sebep ve etkileri Tablo 4.4’de sunulmuştur.

Tablo 4.4. Zayıf yorulma direncinin sebep ve etkileri [173].

Zayıf Yorulma Direnci	
Sebep	Etki
Düşük asfalt yüzdesi	Yorulma çatlağı
Yüksek dizayn boşluğu	Asfaltın çok erken yaşlanması ardından yorulma çatlağı
Yetersiz sıkışma	Asfaltın çok erken yaşlanması ardından yorulma çatlağı
Yetersiz üstyapı kalınlığı	Aşırı eğilmeyi takiben yorulma çatlağı

4.1.7. İşlenebilirlik

İşlenebilirlik, malzemeyi istenilen üniformalık ve kıvamda, sıkıştırma ile kolayca yerleştirebilmektir. Bu özellik; agrega granülometrisi, asfalt çimentosu oranı, en büyük dane boyutu, danelerin şekli ve agrega yüzey dokusu ile çok yakından ilgilidir. 10 no’lu elek altındaki agreganın şekli, bitümlü karışımların özellikleri üzerinde gözle görülür şekilde etkilidir. Köşeli danelere sahip veya kırmataş parçaları içeren kumlar stabiliteyi artırırken, yuvarlak dane şekline sahip kumlar işlenebilirliği arttırmaktadır. Çok fazla kaba agrega ve filler içeren karışımlarda işlenebilirlik kolay olmamaktadır. Ancak işlenebilirliği çok iyi olan karışımlar yumuşak karışımlar olup, bunların trafik yükleri altında deforme olmaları kolaydır. Bazı hallerde iyi derecelenmiş karışım oranı ve yeterli silindirme ile sıkışma olduğu halde bağlayıcı azlığı nedeniyle istenilen yoğunluk sağlanamamakta, bu durum asfalt çimentosu oranının, bitümlü karışımların işlenebilirliği üzerindeki etkisini ortaya koymaktadır [165,173].

Tablo 4.5’te işlenebilirlik probleminin nedenleri ve yol açtığı etkiler incelenmiştir.

Tablo 4.5. İşlenebilirlik problemlerinin sebep ve etkileri [173].

İşlenebilirlik Problemleri	
Sebeup	Etki
Çok büyük dane boyutu	Pürüzlü bir yüzey, serim zorluğu
Çok fazla kaba agrega	Sıkıştırma zorluğu
Çok düşük karışım sıcaklığı	Kaplanmamış agrega, düşük durabilite, pürüzlü bir yüzey, sıkıştırma zorluğu
Çok fazla ara boyutlu malzeme	Karışımın silindir altında ötelenmesi, sıkıştırma zorluğu
Düşük filler yüzdesi	Yumuşak karışım, yüksek geçirgenlik
Yüksek filler yüzdesi	Karışım çok kuru olması, işlenmesinin zor ve durabil olmaması

4.1.8. Geçirimsizlik

Geçirimsizlik, sıcak asfalt kaplama yapısına hava ve suyun nüfus etmesinin bir ölçüsüdür. Kaplamadaki boşluk miktarı ile boşlukların irtibatı kaplamanın üstünden altına kadar su, hava ve su buharının geçmesi için koridorlar oluşturmaktadır. Geçirimsizlik arttıkça hava ve suyun etkisi ile asfaltın yaşlanması hızlanır, soyulma mukavemeti azalır ve donma çözülme tekrarı arttıkça agregalarda parçalanma oluşur. Geçirimsizlik genel olarak asfalt miktarı, sıkıştırma miktarı, agrega gradasyonu ve karışımın yoğunluğunun artmasına bağlı olarak artmaktadır. Kaplamanın geçirimsizliği, bitümlü karışımlarda boşluk oranının az miktarda olmasıyla sağlanmaktadır. Sıcak asfalt karışımlarda minimum boşluk oranı, asfaltın sıcak havalarda genleşmeden ötürü terleme ve kuma ile kaplama dışına çıkmasını önlemek, trafik yükleri altında sıkışmanın sağlanıp digradasyona engel olmak için gereklidir. Karışımındaki maksimum boşluk oranı ise içsel sürtünme açısının azalmasını önlemek, geçirgenliği azaltarak asfaltın sertleşmesini azaltmak için sınırlandırılmaktadır. Ancak bitümlü karışımlarda agrega daneleri arasındaki asfaltla dolu boşluk oranının minimum ve maksimum değerleri sırasıyla, bitümlü temellerde %55-70, binder tabakasında %60-75, aşınma tabakasında ise ortalama %65-75 olması, stabilite için gereklidir.

Boşluk oranının bitümlü temel tabakalarında %5-9, binder tabakasında %4-6 ve aşınma tabakasında ise %3-5 arasında olması, geçirimsizliği sağlamak ve yoğunluğu arttırmak için KTŞ tarafından belirlenmiştir [175,176].

Karışımlarda görülen geçirimliliğin nedenleri ve sonuçları Tablo 4.6'da ele alınmıştır.

Tablo 4.6. Karışımları geçirimli yapan sebep ve etkiler [173].

Geçirimsizlik	
Sebep	Etki
Düşük asfalt yüzdesi	İnce asfalt filmi erken yaşlanma ve sökülme yol açmaktadır.
Karışım dizaynında yüksek boşluk yüzdesi	Su ve havanın karışıma kolay bir şekilde girip, oksidasyon ve ayrışmaya neden olması

Tablo 4.7’de BSK bağlayıcı ve agrega özellikleri karşılaştırılmıştır.

Tablo 4.7. BSK’ların özelliklerine etki eden parametreler [5].

Karışım Özelliği	BAĞLAYICI				AGREGA			
	Miktar		Katılık		Yoğunluk		Agrega Tipi	
	Fazla	Az	Katı	Yumuşak	Çok Yoğun	Az Yoğun	Köşeli Pürüzlü Poroz	Yuvarlak Cilalı Az Poroz
Stabilite	Optimum		✓		✓		✓	
Rijitlik			✓		✓		✓	
Dayanıklılık	✓		✓		✓		✓	
Yorulma Mukavemeti	✓			✓	✓		✓	
Esneklik	✓			✓		✓		✓
Geçirimsizlik	✓		✓		✓			
Kayma Direnci		✓	✓			✓	✓	
İşlenebilirlik				✓		✓		✓
Karışım Özelliği	SIKIŞMA		ISI		YÜKLEME HIZI		KARIŞIM KALINLIĞI	
	Çok	Az	Çok	Az	Yüksek	Düşük	Çok	Az
Stabilite	✓			✓	✓		✓	
Rijitlik	✓			✓	✓		✓	
Dayanıklılık	✓				✓		✓	
Yorulma Mukavemeti	✓				✓		✓	
Esneklik		✓	✓		--	--		✓
Geçirimsizlik	✓				--	--	✓	
Kayma Direnci	✓			✓	--	--	--	--
İşlenebilirlik	--	--	✓		--	--		✓

4.2. Asfalt Betonlu Kaplamalarda Görülen Bozulmalar

Asfalt betonu kaplamalarda görülen bozulmalar genel olarak deformasyonlar, çatlaklar ve ayrışmalar olmak üzere 3 farklı tipte oluşmaktadır:

- a) Kötü malzeme seçimi: Kullanılan malzemenin şartnamede belirtilen kriterlere uygun olmayan, homojen olmayan malzemeden seçilmesi, aşırı oranda dere malzemesi kullanımı, kil oranı yüksek agrega seçimi, agrega yapısının cilalanmaya müsait ve dayanımı düşük agregadan oluşması,
- b) Asfalt betonu karışım oranı kusurları: Agreganın granülometrisinin, agrega ve asfalt oranı yüzdelilerinin hatalı seçimi, yetersiz sıcaklık kontrolü,
- c) Asfalt betonu kaplama uygulama hataları: İmalatların uygun olmayan hava ve çevre koşullarında yapılması, asfaltın aşırı ısıtılması, düşük karışım, serim ve sıkıştırma ısısı, serim sırasında segregasyon, aşırı sıkıştırma, yetersiz sıkıştırma ve sıkıştırma tekniklerindeki yanlışlıklar, astar ve yapıştırma tabakalarındaki özensizlik ve uygulamada hataların yapılmasıdır.

Esnek kaplamalarda meydana gelen bozulmalar nedenleri bakımından aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir.

- Yol üst yapısını oluşturan alt temel ve taban zemini taşıma gücünün yetersiz olması, yeraltı su seviyesinin yüksekliği, zeminde meydana gelen oturmalar, şişme ve rötre gibi hacim değişiklikleri, don derinliğindeki artış, dolguların iyi bir şekilde sıkıştırılmaması, drenajın yetersiz yapılması, kapileritenin oluşması gibi nedenler,
- Trafiğin neden olduğu aşırı trafik hacmi ve yükü gibi faktörler,
- İklim koşulları gibi çevre etkilerinin neden olduğu aşırı yağış ve yüksek hava ısısı gibi faktörler,
- Asfalt betonunun malzeme özelliklerinden, karışım oranlarından, imalatından ve uygulanmasından kaynaklı bozulmalardır [165,175,176,193].

4.2.1. Deformasyon Kusurları

- Karayollarında en fazla görülen bozulmalardan biri deformasyon kusurları olup, kaplama yüzeyindeki kotun değişimine bağlı şekil değişimlerinden kaynaklanmaktadır. Deformasyondan kaynaklanan kusurlar asfalt tabakasını oluşturan agregaların yer değiştirme dirençlerinin düşük, asfalt tabakalarının kayma mukavemetinin ve karışım viskozluğunun az olmasından meydana gelmektedir. Kayma mukavemetinin düşük olması, malzemeye ait yoğun olmayan gradasyon, agrega tipinin cilalı ve yuvarlak biçimde olup, kilitleme dirençlerinin düşük olması, yüksek penetrasyonlu asfalt kullanılması gibi imalatlar, sıkıştırma gibi

uygulama hataları ile trafik ve çevre koşullarından kaynaklanan kusurlardır. Deformasyonlar yol üst yapısını oluşturan tabakalar ve taban zeminini hareketlemelerden dolayı oluşabildiği gibi yol üst yapısını oluşturan tabakaların özellikle kaplama tabakasının stabilitesinden de kaynaklanabilmektedir. Deformasyonlar esnek yol üst yapısında ve taban zemininde tekerlek izi oluşumu, lastik deseni oluşması, kabarma, yığılma, ondülasyon, oturmalar ve yerel göçmeler şeklinde çeşitli tiplerde oluşabilmektedir [165,175,176,193].

4.2.1.1. Tekerlek İzleri

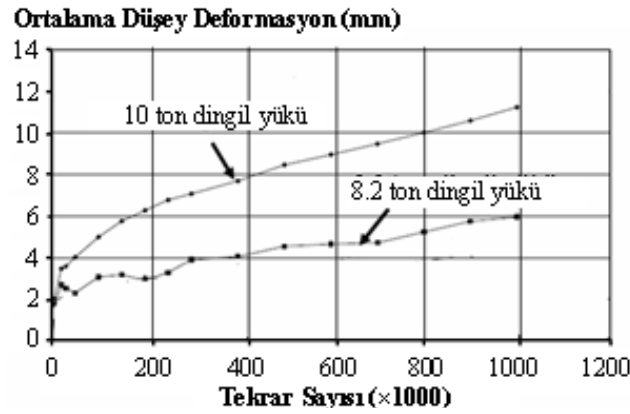
Tekerlek izleri, yüksek hava sıcaklıklarındaki ağır taşıt trafiğinin yoğun olduğu çevre ve iklim koşullarındaki yollarda meydana gelip, BSK'ların stabilite problemleri ile uygulama kusurları gibi durumlarda daha çok görülmektedir. Tekerlek izi olukları, taşıtların sürüş emniyeti açısından tehlike ve belli hıza sahip taşıtların sürüş konforu bakımından olumsuzluk meydana getirmektedir. Kaplama yüzeyindeki taşıt tekerleklerinin yol açtığı oluklar veya kanallarda biriken suların donması, yolu kullananlar için tehlike oluşturmaktadır. Yolun içine nüfus eden sular, yapısını oluşturan agregaların soyulmasına yol açmakta, asfaltın oksidasyona uğramasına neden olup, diğer bozulma çeşitlerinin oluşmasına olanak sağlamaktadır. A.B.D ve Avrupa ülkelerinde tekerlek izi kusurlarının önlenmesi için boşluklar yoğun bir şekilde asfalt betonu ve soğuk asfaltla doldurulup sıkıştırılarak üzerine ince sıcak asfalt karışım serilip sıkıştırılmaktadır. Tekerlek izi oluşumlar, yol üst yapısını oluşturan alt tabakalara ve bitümlü tabakalara bağlı olarak meydana gelmektedir.

- Alt tabakalara bağlı nedenler: Alt tabakaların ve taban zemininin konsolidasyona uğraması, alt tabakaların kalınlıklarının yetersiz olması ve alt tabakalardan kaynaklanan nedenlerdir.
- Bitümlü tabakalara bağlı nedenler: Karışımdaki asfalt ve filler yüzdesinin çok yüksek olması, yüksek penetrasyonlu asfalt ve karışımda yuvarlak dere malzemesinin kullanılması, aşınma tabakasının yetersiz sıkışması, ağır taşıt trafiği etkisinde aşırı sıkışması ve karışımın stabilitesinin yetersiz olması şeklindedir.
- Trafik ve çevre etkilerine bağlı nedenler: Yüksek tekerrür sayısı, ağır taşıt trafiği, aşırı hava sıcaklıkları ve yeraltı su seviye yüksekliğinden kaynaklanmaktadır.

- Trafik etkisinden kaynaklanan nedenler: Lastik hava basıncı, yükleme zamanı ile yükler arasındaki zaman aralıkları, dingil yükleri, ağır taşıt miktarları ve tiplerinden oluşmaktadır [165,175,176,193].

Tekerlek izi oluşumu, karayollarının özellikle otobüs durakları ve kavşak kısımlarında yoğunlaşmaktadır. Dış tekerlek yörüngesinde ortaya çıkan tekerlek izi, banket ile kaplama arasında boyuna çatlak oluşmasına neden olmaktadır [194,195].

Şekil 4.1’de farklı dingil yüklerine bağlı kaplamada görülen ortalama düşey deformasyonlar verilmiş olup, dingil yükündeki artışla deformasyonda doğrusal bir şekilde artışlar görülmüştür.

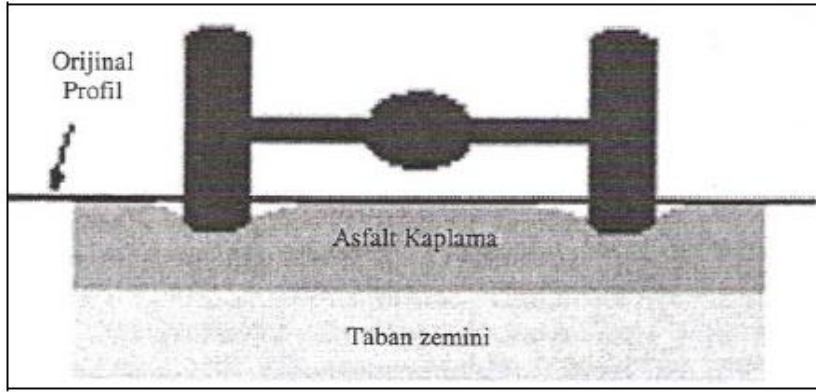


Şekil 4.1. Kaplamada oluşan farklı dingil yüklerine bağlı deformasyonlar [172].

Yol yapısında oluşan kalıcı deformasyon birikiminden tekerlek izi oluşmaktadır. Yüzeysel, yapısal ve akma tekerle izleri olarak üç farklı şekilde oluşmaktadır.

4.2.1.1.1. Yüzeysel Tekerlek İzi

Yüzeysel tekerlek izinin temel nedeni sıkıştırmanın yetersiz yapılmasıdır. Çivili lastik olarak tanımlanan lastiklerin oluşturduğu aşınma nedeniyle oluşmaktadır. Şekil 4.2’de görüldüğü gibi, tekerlek yörüngesi dışında kaplamada yükselme görülmemektedir.

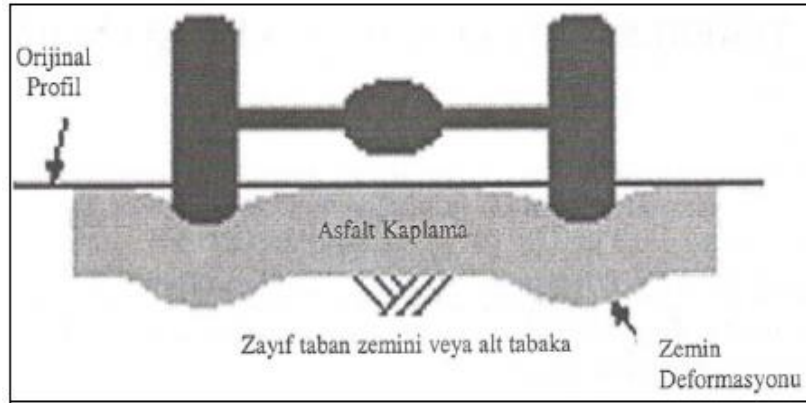


Şekil 4.2. Konsolidasyon ve yüzeysel tekerlek izi [194,196,197].

4.2.1.1.2. Yapısal Tekerlek İzi

Bu tür tekerlek izleri, bitümlü tabaka altındaki tabakaların veya zayıf taban zemininin oturması ile oluşan deformasyonlardan meydana gelmektedir. Tekerlek yörüngesi dışında yolda herhangi bir değişiklik olmayıp sadece tekerlek yörüngesi boyunca kaplamada oturmalar oluşmaktadır [196].

Yapısal tekerlek izi Şekil 4.3'teki gibidir.



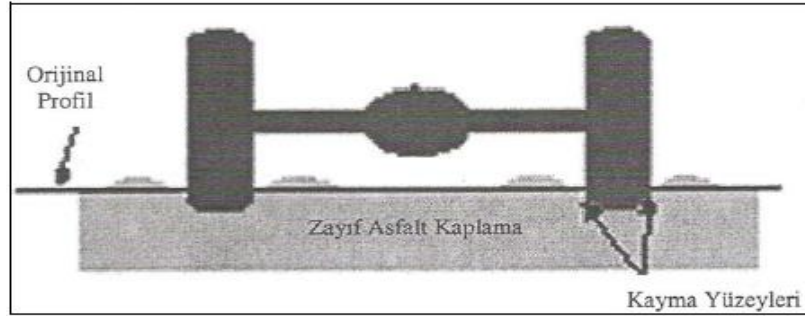
Şekil 4.3. Yapısal tekerlek izi [194,196,197].

4.2.1.1.3. Akma Tekerlek İzi

Kayma dayanımı düşük bitümlü kaplama tabakalarında, tekrarlı ağır dingil yükler altındaki deformasyon nedeniyle akma tekerlek izi ortaya çıkmaktadır. Bu tür tekerlek izi oluşumu, yapısal nedenlerden çok karışım tasarımı ile ilgilidir. Sıcak iklim dönemlerinde

BSK'ın kayma dayanımlarının düşük olması sonucu, kaplama tabakasının yanal yer değiştirmesi şeklinde, tekerlek yörüngesinde oluşmakta ve tekerlek yörüngesi dışında kaplama tabakasında yükselme oluşmasına neden olmaktadır [196].

Şekil 4.4'te dingil yükü altında asfalt kaplamada görülen kayma ve akma yüzeyleri gösterilmiştir.



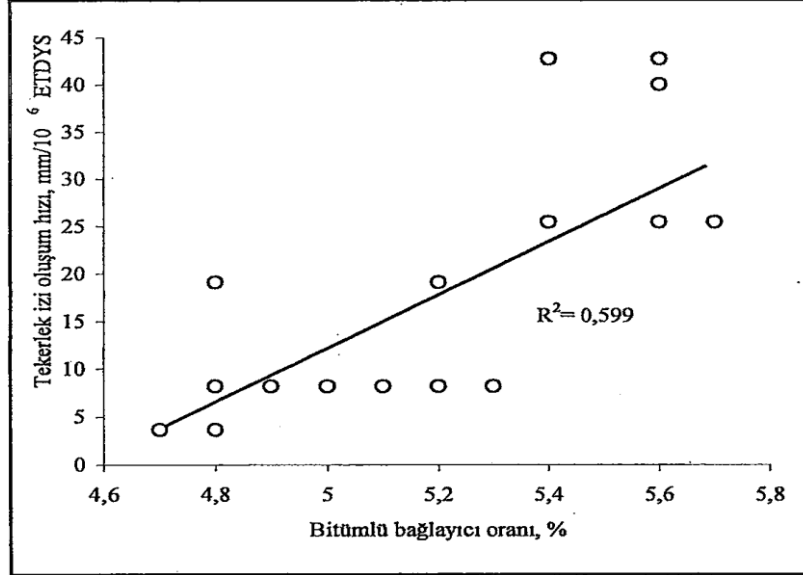
Şekil 4.4. Akma tekerlek izi [194,196,197].

Huber ve Heiman'a göre, Tablo 4.8'de tekerlek izi derinlik ve oluşum hızlarının asfalt betonu kaplamalarda mevcut durum ve yapım sonrası parametrelere bağlı değişimleri gösterilmiştir [198].

Tablo 4.8. Tekerlek izi oluşum hızı ile bitümlü karışım parametreleri arasındaki korelasyon katsayısı [198].

Parametre	Yapım Sonrası				Mevcut Durum			
	Tekerlek İzi Derinliği, mm		Tekerlek İzi Oluşum Hızı (mm/10 ⁶ ETDYS)		Tekerlek İzi Derinliği, mm		Tekerlek İzi Oluşum Hızı (mm/10 ⁶ ETDYS)	
	Korelasyon, R ²	Olasılık	Korelasyon, R ²	Olasılık	Korelasyon, R ²	Olasılık	Korelasyon, R ²	Olasılık
Bitümlü bağlayıcı oranı	0,134	0,332	0,673	0,007	0,082	0,456	0,667	0,007
Agrega köşeliliği	0,269	0,153	0,229	0,193	0,074	0,516	0,004	0,881
V _b	0,221	0,202	0,483	0,038	0,182	0,252	0,234	0,187
VMA	0,111	0,379	0,124	0,352	0,001	0,927	0,262	0,159
Hveem stabilitesi	0,221	0,213	0,490	0,037	0,279	0,144	0,489	0,036
Marshall stabilitesi	0,111	0,380	0,056	0,540	0,019	0,723	0,227	0,194
Penetrasyon	-	-	-	-	0,004	0,879	0,187	0,245
Viskozite	-	-	-	-	0,042	0,599	0,082	0,456
VFA	-	-	0,530	0,026	0,211	0,213	0,282	0,141

Huber ve Heiman yaptıkları çalışmada, bitümlü bağlayıcı oranı ve tekerlek izi oluşum hızı arasındaki ilişkiyi Şekil 4.5'te gösterildiği gibi incelemiştir.



Şekil 4.5. Bitümlü bağlayıcı oranı ve tekerlek izi oluşum hızı arasındaki ilişki [198].

Tekerlek izi oluşumu ve ölçüm teknikleri Şekil 4.6'daki gibidir.



Şekil 4.6. Tekerlek izi oluşumu ve ölçümü

4.2.1.2. Lastik Deseni (Paterni)

Lastik deseni şeklindeki deformasyonlar genellikle sıcak havanın yoğun olarak görüldüğü bölgelerde ağır taşıt trafiği hacmine maruz kalan yollarda görülmektedir. Deformasyonlar ağır taşıt lastiklerinde yer alan liv desenlerinin kaplama yüzeyinde iz

bırakmasından oluşmaktadır. Lastik desenlerine yüksek hava ısısı, aşırı kuma terleme, yüksek penetrasyonlu asfalt kullanılması, düşük stabilite, ağır taşıt yükleri ve tekerrür sayılarının fazlalığı ve yüksek eğimli tırmanma şeritlerindeki ağır trafiğin düşük hızda hareketi gibi sebepler neden olmaktadır. Bu tür deformasyonlar genellikle yüzeysel olarak meydana geldiğinden, yapısal oluşmamaktadır. Lastik deseni derinliklerinin fazla olması, biriken civar sularının ani soğuması ile kaygan yüzeyler yaratmakta dolayısıyla sürüş konforu ve emniyeti açısından tehlike yaratmaktadır. Lastik deseni deformasyonlarını önlemek için ağır taşıt trafiğe maruz kalan bölgelerdeki yollarda daha düşük penetrasyonlu bitüm kullanımı tercih edilmektedir [165,175,176,193].

Şekil 4.7’de asfalt betonu kaplamalarındaki lastik deseni oluşumları gösterilmiştir.



Şekil 4.7. Asfalt betonu kaplama lastik deseni oluşumları

4.2.1.3. Ondülasyonlar

Bu tip deformasyonlar dalgalanma şeklinde bölgesel olarak meydana gelmektedir. Genellikle aşırı eğimli tırmanma şeritleri, kavşaklar, yaya geçişleri ve otobüs duraklarında daha yaygın görülmektedir. Genel olarak;

- Aşırı asfalt kullanımı
- Yüksek penetrasyonlu, düşük viskoziteli asfalt uygulaması
- Aşınma tabakası ve binder tabakası kalınlığı yetersizliği
- Zayıf yapıştırma tabakası serimi
- Otobüs durağı, trafik ışığı, kavşaklarda durma, frenleme ve kalkma hareketlerinin yoğun olması

- Dik eğimli yamaçlarda yer alan yollarda, ağır taşıt hareketleri gibi nedenlerden kaynaklanmaktadır.

Ondülasyonları önlemek için yüksek stabiliteli karışımlar kullanılmalıdır. Ondülasyonların onarımı genellikle kusurlu bölgeler kazılarak yerine uygun bir karışım konulup, sıkıştırılarak yapılmaktadır [165,175,176,193].

Asfalt betonu kaplamalarda görülen ondülasyonlara ait örnek Şekil 4.8’de verilmiştir.



Şekil 4.8. Asfalt betonu kaplama ondülasyonları [171].

4.2.1.4. Oturmalar (Bölgesel çökmeler)

Yol üst yapısını oluşturan tabakalardan bitümlü tabakalara bağlı olmadan alt tabakalardaki bozulmaların yüzeye yansımından oluşmaktadır. Bölgesel çökme ve oturma şeklinde görülmektedir. Genel olarak;

- Aşırı segregasyon ve yetersiz gradasyon
- Drenaj yetersizliği, zemin ve imalat problemleri
- Yetersiz veya üniform olmayan sıkıştırma
- Yeraltı su seviyesinin yüksek olması
- Kaplama su içeriğinin aşırı artması
- Taban zeminindeki killerin granüler alt temel ve temel tabakalarına yükselerek yolun yapısını bozması
- Aşınma tabakasını oluşturan malzemelerin stabilitesini kaybederek parçalanma artışı

Asfalt betonu kaplamalarda görülen bölgesel çökmeler ve oturmalar sırasıyla Şekil 4.9 ve Şekil 4.10’da gösterilmiştir.



Şekil 4.9. Asfalt betonu kaplamada görülen bölgesel çökmeler

Bu tip bozulmalarda deformasyona uğrayan bölgesel kesimler kazılıp atılarak, yerine sıcak veya soğuk karışımlar serilerek sıkıştırma yapılmaktadır. Bozulmaların meydana gelmemesi için şartnamelere uygun dizayn yapılması ve uygulanması gerekmektedir [165,175,176,193].



Şekil 4.10. Asfalt betonu kaplamasındaki oturmalar

4.2.1.5. Kabarmalar

Taban zeminde şişme potansiyeli yüksek killerin bulunması ve don etkisinden dolayı üst yapının şişmesinden oluşmaktadır. Bu bakımdan yollar projelendirilirken don etkisi dikkate alınmalı, üst yapı inşa edilmeden önce temel tabanı drenaj ve stabilizasyon problemlerin giderilmesine yönelik zemin iyileştirilmeleri yapılmalıdır [165,175,176,193].

Şekil 4.11'deki gibi asfalt betonu kaplamalarda kabarma ve yığılmalar meydana gelmektedir.



Şekil 4.11. Asfalt betonu kaplamasında görülen kabarma ve yığılmalar

4.2.1.6. Yığılmalar

Yol eksenine dik veya paralel olarak asfalt betonu kaplamanın üst kısmının taşıt lastiğinin mekanik etkisi ile oluşmaktadır. Yüksek sıcaklıklara, stabilite yetersizliğine, tabakalar arasındaki yapıştırıcı tabakanın uygun olarak kullanılmamasına bağlı olarak meydana gelmektedir. Yığılmaların önüne geçmek için sert bitüm bağlayıcı ve yüksek stabiliteli karışım uygulaması yapılmalıdır [165,175,176,193].

4.2.1.7. Üniform Olmayan Düzensiz Yüzey Bozuklukları

Taban zemini ve temel tabakalarındaki oturmalarından oluşmaktadır. Üniform olmayan yüzey bozuklukları; zemin dayanımının düşük, yetersiz drenaj, temel stabilitesinin yetersiz oluşu, kaplama kalınlığının uygun olmaması, banket yanal desteği eksikliği, su seviyesin ve don derinliğinin fazlalığı gibi nedenler en önemli etkenler olarak bilinmektedir. Yolun tümünde ve büyük bir kısmında meydana geldiğinden bölgesel tamir ve onarım ile bozulmaların giderilmesi zor olmaktadır [165,175,176,193].

Asfalt betonunda görülen üniform olmayan yüzey bozuklukları Şekil 4.12'deki gibidir.



Şekil 4.12. Asfalt betonu üniform olmayan yüzey bozuklukları [199].

4.2.2. Ayrışma Kusurları

Yol üst yapısını oluşturan aşınma tabakasındaki agrega danalarının iklim, trafik gibi çevre ve hava koşullarının yol açtığı mekanik etkiler nedeniyle kopma ve parçalanma şeklinde kaplama tabakasından ayrılmasıyla ayrışma kusurları oluşmaktadır. Ayrışmalar başlangıç aşamasında önlenmediği takdirde kaplama ömrünün ksalmasına neden olmakta, trafik ve iklim koşullarıyla zamanla artarak sürüş konforu ile trafik güvenliğinin azalmasına yol açmaktadır.

Ayrışmalar genel olarak yapım ve uygulama hatalarından kaynaklanmakta olup, üniform olmayan karışım ve kompaksiyon yapılması, yetersiz adezyon ve yüksek penetrasyonlu asfalt seçimi, düşük kaliteli malzeme kullanımı, serim sırasındaki segregasyon gibi nedenlerden meydana gelmektedir.

Ayrışmalar; folluk tipi oyuklar, sökûlmeler, tabaka halinde sökûlmeler, soyulma, kayganlık, cilalanma ve kuma gibi türlerden oluşmaktadır [165,175,176,193].

4.2.2.1. Folluk Tipi Oyuklar

Dairesel olarak 25-75 cm çapında çanak şeklinde meydana gelen ayrışmalardır. Genellikle kaplamanın ayrışmaya karşı düşük dirençli olmasından oluşmaktadır. Düşük dirence; aşınma tabakasının kalınlığının, ince malzeme miktarının ve asfalt miktarının az olması, alt tabakalardaki yetersiz drenaj uygulamaları neden olmaktadır. Bu tip oyuklar tasarım koşullarının yerine getirilerek kaliteli bitüm ve agrega kullanılması, uygulama sırasında şartnamelerin öngördüğü koşulların sağlanması ile önlenabilir [165,175,176,193].

Şekil 4.13’te asfalt betonu kaplamalarda folluk tipi oyuklar görülmektedir.



Şekil 4.13. Asfalt betonu kaplama folluk tipi oyuklar

4.2.2.2. Sökülmeler

Aşınma tabakasının parça ve tabaka halinde meydana gelmesinden sökülmeler oluşmaktadır. Sökülmeler agrega danelerinin yukarıdan aşağıya doğru kenardan içe doğru yüzeyden kopması şeklindedir. Sökülmeler ilk olarak ince malzemelerde meydana gelerek küçük çukurlara yol açmakta daha sonra büyük parçalar koparak parçalar ve tabakalar halinde oluşmaktadır. Yetersiz ve üniform olmayan sıkıştırma, asfalt miktarının azlığı, ince aşınma tabakası uygulaması, segregasyona uğramış temiz olmayan agrega seçimi, karışım sırasında asfaltın aşırı ısıtılması, soğuk ve nemli havadaki imalat gibi nedenler sökülmelere neden olur. Bu kusurlar başlangıç aşamasında koruyucu tabaka uygulanarak yavaşlatılabilir [165,175,176,193].

Şekil 4.14’te asfalt betonu kaplamalara ait aşınma tabakasındaki sökülmelerden dolayı agrega kayıpları meydana gelmiştir.



Şekil 4.14. Asfalt betonu kaplaması aşınma tabakası agrega kaybı

4.2.2.3. Tabaka Halindeki Sökülmeler

Yüzey tabakası ve alt tabakalar arasındaki yapıştırma tabakasının kullanılmaması veya yetersiz olması, yüzey tabakasının ince olması nedeniyle daha çok derz çatlakları kısımlarında oluşan bozulma türüdür.

4.2.2.4. Kuma

Hava sıcaklıklarının yüksek ve karışımdaki asfalt yüzdesinin fazla olması, boşluk yüzdesinin çok düşük olması, astar ve yapıştırma tabakalarının çok kalın serilmesi gibi nedenlerden dolayı asfaltın sıcaklık etkisi ile yüzeye çıkarak kalın bir asfalt filmi oluşturmasıyla meydana gelmektedir. Kusmalar uygun bağlayıcı seçimi ve boşluk oranı bakımından dikkatli olunmasıyla önlenebilmektedir [165,175,176,193].

Şekil 4.15, asfaltta oluşan kuma tipi bozulmalardandır.



Şekil 4.15. Asfalt kuması

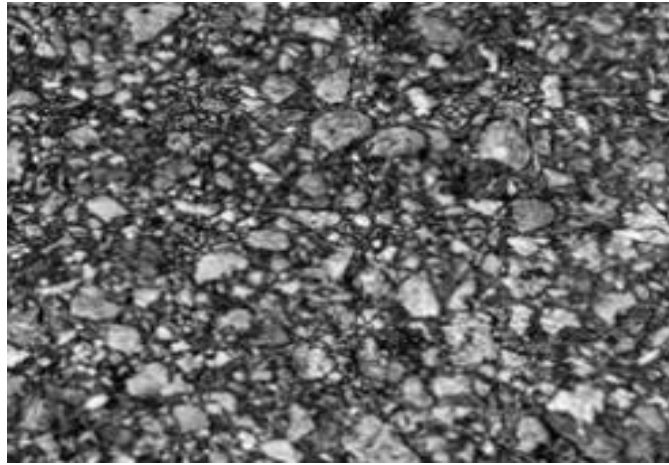
4.2.2.5. Kayganlık

Kaplama tabakasında taşıtların yol açtığı aşındırma etkisi nedeniyle kayma direncinin azalması dolayısıyla yüzeydeki agregaların cilalanmasıyla oluşmaktadır. Yüzeyin ıslak olması durumunda taşıt trafiği ve yüksek hızdaki trafik akışı bakımından tehlikeye yol açan bozulma tipidir.

4.2.2.6. Cilalanma

Aşınma oranı yüksek olan agregaların taşıt trafiğinin yol açtığı aşındırma etkisi ile pürüzlülüğünü kaybetmesiyle oluşmaktadır. Cilalanmanın yol açtığı bozulmaları önlemek için köşeli ve pürüzlü agregalar kullanılarak aşınma oranı düşük malzeme seçimine özen gösterilmeli taşıt trafiğinin yoğunluğuna göre agregalar seçimi yapılmalıdır [165,175,176,193].

Asfalt betonu kaplamalarda görülen cilalanma etkisi Şekil 4.16'daki gibidir.



Şekil 4.16. Asfalt betonu kaplama cilalanması

4.2.2.7. Soyulma

Agrega danelerini saran asfalt filminin trafik ve iklim gibi çevre koşulları nedeniyle agregadan ayrılmasıyla soyulma oluşmaktadır.

Şekil 4.17, asfalt film tabakasında görülen soyulmaya örnektir.



Şekil 4.17. Agregalardaki asfalt filmi soyulması

4.2.3. Çatlamalar

Esnek kaplamalarda oluşan çatlaklar kaplama yüzeyinde çevre, iklim ve trafik gibi nedenlerden dolayı çok çeşitli şekillerde genişlik ve derinlikte meydana gelmektedir.

4.2.3.1. Stabilite Çatlakları

Trafik yükleri kaplamalarda basınç ve çekme gerilmelerine yol açmakta, üst tabakalarda basınç gerilmeleri alt tabakalarda ise çekme gerilmeleri oluşmaktadır. Kaplamanın alt tabakalarındaki çekme gerilmelerinin çekme mukavemetini aşması durumunda, stabilite çatlakları trafik etkisiyle alt tabakalardan başlayarak üst tabakalara doğru çatlama şeklinde oluşmaktadır. Çatlaklar zeminin ve kaplamanın yetersiz stabilitesinden, dikdörtgene yakın bloklar halinde yolun tüm kesiminde görülebilmektedir [175,176,193].

Şekil 4.18’de kaplama tabakasında blok şeklinde çatlamlar oluşmuştur.



Şekil 4.18. Asfalt betonundaki blok şeklindeki çatlamlar

4.2.3.2. Yorulma Çatlakları

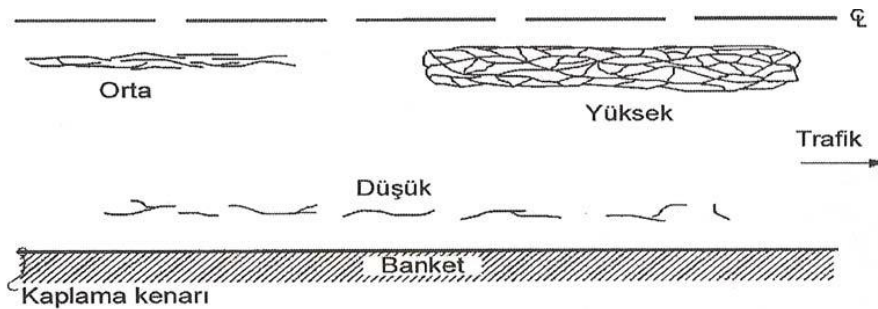
Yorulma çatlakları, tekrarlı ağır taşıt trafiği yükleri ile kaplamanın yorulma mukavemetinin aşılması ile oluşmaktadır. Kaplamanın mekanik özelliklerinden kaynaklanan yorulma çatlakları, taşıt trafik hacmine bağlı olarak teker izi yörüngesinde öncelikle boyuna kılcal çatlaklar şeklinde oluşmakta ve daha sonra enine çatlaklar ile petek şeklinde görülmektedir. Kaplamanın yorulma mukavemeti ve taşıt hacmini etkisinde düşük, orta ve yüksek olmak üzere değişik şiddetlerde meydana gelmektedir [175,176,193].

Şekil 4.19, asfalt betonu kaplamalardaki yorulma çatlakları kusurlarındandır.



Şekil 4.19. Asfalt betonu yorulma çatlakları kusurları [199].

Şekil 4.20’de yorulma çatlakları tiplerinin davranışları belirtilmiştir.



Şekil 4.20. Yorulma çatlakları [193].

4.2.3.3. Yansıma Çatlakları

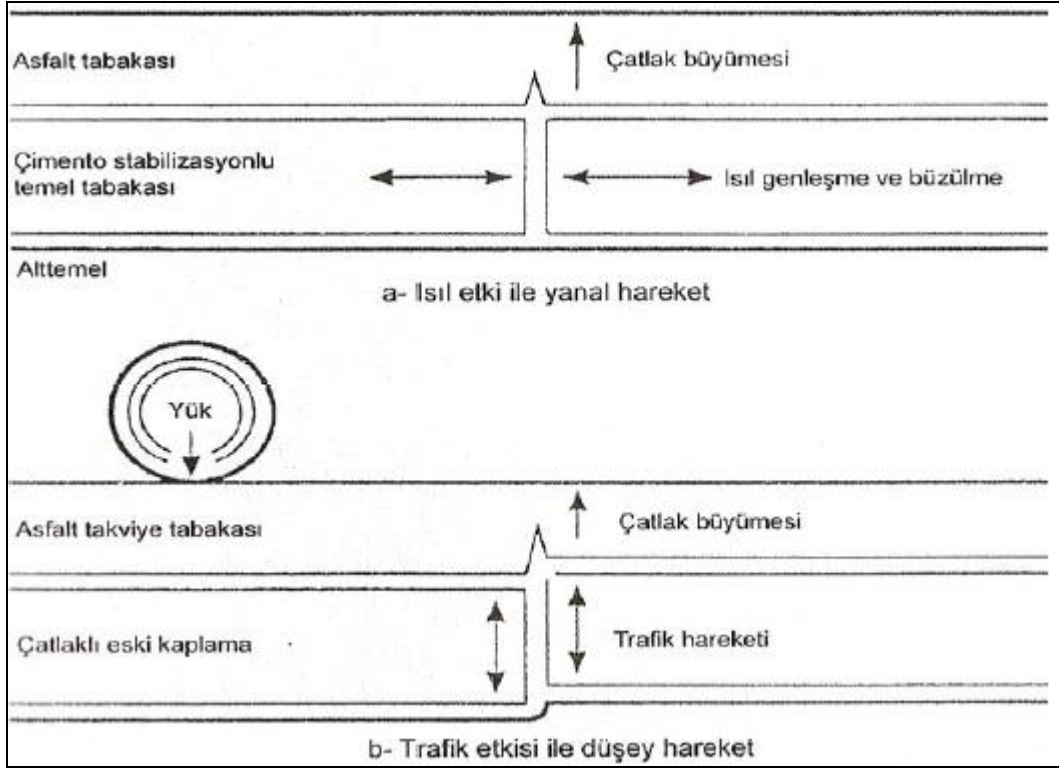
Trafik yükleri, sıcaklık etkisi ve zemin hareketleri ile takviye tabakası altındaki kaplamanın yatay ve düşey yöndeki hareketlerinden yansıma çatlakları oluşmaktadır. Çimento ve kireç stabilizasyonlu temeller üzerine yapılan kaplamalar ile rijit kaplamalar üzerine takviye tabakası olarak serilen asfalt betonu kaplamalarda görülmektedir. Alt tabakalardaki çatlakların üst tabakalara yansmasıyla boyuna, enine, blok ve köşegen şeklinde meydana gelmekte daha çok takviye tabakalarının ince olmasından kaynaklanmaktadır. Yol üzerindeki yansıma çatlaklarıyla ilgili yapılan incelemelerde çatlakların yol yüzeyinden başlayıp stabilize tabakalarda meydana gelen çatlaklarla birleştirildikleri görülmüştür. Soğuk kış koşullarında kaplama yüzeyinde oluşan termal büzülme üst yapının eğilme ve bükülmesine yol açarak çatlaklara neden olmaktadır. Çatlaklar, üst yapıyı oluşturan tabakalar aşırı rijit davranarak termal büzülmelerden dolayı ortaya çıkan çekme gerilmesi ve şekil değiştirmelere az direnç göstermesinden kaynaklanmaktadır. Mevcut çatlaklar ve derzler takviyeden önce emülsiyon ve katbek asfaltı, kum gibi malzemelerle tamir edilerek ayrıca takviye tabakası kalınlıkları artırılarak çatlaklar önlenilebilir [165,190,194,200].

Asfalt betonu kaplamalarda meydana gelen yansıma çatlakları Şekil 4.21’de sunulmuştur.



Şekil 4.21. Asfalt betonu kaplama yansıma çatlağı

Şekil 4.22’de yol üst yapısı tabakalarında görülen yansıma çatlaklarının oluşumları açıklanmıştır.



Şekil 4.22. Yansıma çatlağının oluşumu [193,201].

4.2.3.4. Timsah Sırtı Çatlaklar

Kümes teli, bal beteği gibi timsah sırtı şeklinde değişik boyuttaki bloklar halinde kaplamanın tüm kesiminde veya bir kısmında oturmadan, yorulma mukavemetinin aşılmasından oluşmaktadır. Stabil olmayan temel ve zemin tabakasındaki yetersiz drenajdan dolayı tabakaların doygun hale gelerek taşıma gücünü kaybetmesi sonucu yolun belirli bir kesiminde görülen oturma şeklindeki çatlaklar ile aşırı trafik yükündeki tekerrür sayısı sonucu kaplamanın yorulma mukavemetini aşması sonucu yolun büyük bir kısmında yorulma sonucu oluşan çatlaklardan meydana gelmektedir [175,176].

Kaplama tabakalarında görülen timsah sırtı çatlakları Şekil 4.23'teki gibi meydana gelmektedir.



Şekil 4.23. Asfalt betonu kaplamalardaki timsah sırtı çatlak bozulmaları [202].

4.2.3.5. Kenar Çatlakları

Kaplama kenarı yakınlarında boyuna çatlaklar ve banket kenarına doğru enine dallanma şeklinde oluşan çatlaklar kenar çatlakları olarak tanımlanmaktadır. Kenar çatlakları; kötü drenaj, çevre zemininin kuruması ve don kabarması gibi büzölmelerden dolayı çatlak alanının oluştuğu alan altındaki temel malzemesinin oturması ve çökmesinden kaynaklanmaktadır. Kenar çatlakları kum ile karıştırılmış katbeg asfaltı ve sıcak asfalt karışımlarla yama yapılarak gerekli koda getirilip onarılmaktadır [194].

Şekil 4.24, asfalt betonu kaplamalarda görölen kenar çatlağı bozulma türüdür.



Şekil 4.24. Asfalt betonu kaplama kenar çatlağı

4.2.3.6. Derz Çatlakları

BSK'larla yapılan yollarda iki şerit arasında ve banketle kaplama tabakası arasında görülen çatlaklardır. İkinci şeridin dökülmesi sırasında birinci şeride yeterli bindirmenin yapılmaması gibi yapım hatalarından kaynaklanan kusurlar zaman içerisinde derz çatlaklarının oluşmasına dolayısıyla iki şeridin birbirinden ayrılmasına yol açmaktadır [165].

Şekil 4.25'te kaplama tabakalarında görülen boyuna derz çatlağı görülmektedir.

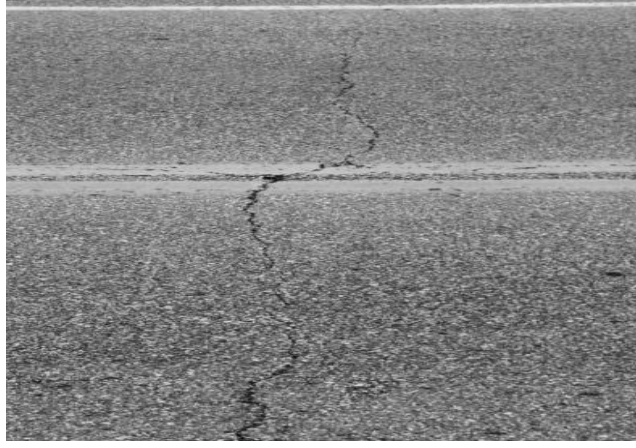


Şekil 4.25. Asfalt betonu kaplama boyuna derz çatlakları

4.2.3.7. Enine Çatlaklar

Yol eksenine dik bazen de açılal olarak kaplama tabakasında nadir olarak görülen çatlaklardır. Köprü ve drenaj gibi sanat yapılarının bulunduğu kısımlarda daha sık görülmektedir. Yolun tüm kesimlerinde yol eksenine dik kılcal çatlaklar şeklinde oluşmakta olup, yolun yapım aşamalarındaki uzun süren duraklamalar, ani sıcaklık değişimleri gibi hava koşullarının kaplamalarda oluşturduğu ilave gerilmeler, yetersiz drenaj ve üst yapı kalınlığının az olması gibi nedenler enine çatlak oluşumuna yol açmaktadır [165,175,176,193].

Şekil 4.26'da enine derz çatlağı bozulmaları görülmektedir.



Şekil 4.26. Asfalt betonu kaplamadaki enine çatlaklar

4.2.3.8. Yüzey Kayması Çatlakları

Tekerlek yüklerinin meydana getirdiği yatay kuvvetlerin etkisi ile yüzey tabakasının alt tabaka üzerinde kaymasıyla oluşan iç içe hilaller şeklinde oluşan parabolik çatlaklardır. Öteleme çatlakları yüzey ve alt tabakalar arasında kullanılan yapıştırma tabakasının tozlanması, ıslanması, kullanılmaması veya yetersiz olması gibi nedenlerden ötürü iki tabaka arasında adezyonun yetersiz olmasına yol açıp, kaymalara dolayısıyla yüzey kayması çatlaklarına neden olmaktadır [165].

Şekil 4.27’de, kaplama tabakalarında görülen yüzey kayması çatlağı bozulmaları verilmiştir.



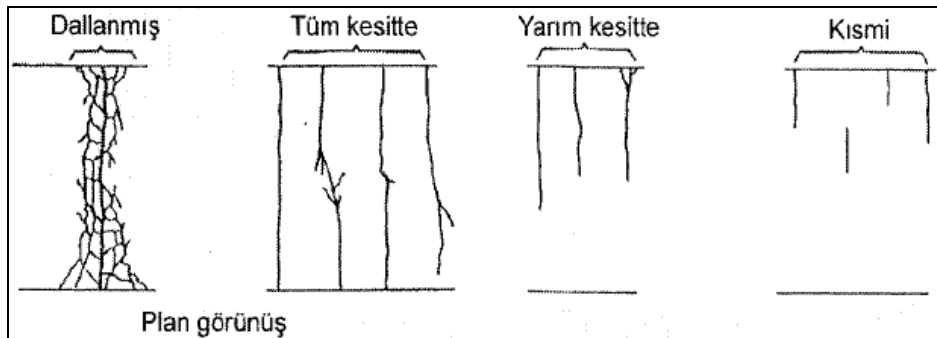
Şekil 4.27. Asfalt betonu kaplamalardaki kayma çatlağı

4.2.3.9. Düşük Sıcaklık Çatlakları

Büzülme çatlakları, esnek üst yapıyı oluşturan tabakalarda meydana gelen hacimsel değişikliklerden kaynaklanmaktadır. Çatlaklar üniform olmayan bir şekilde dar açılı ve sivri köşeli büyük bloklar halinde değişik boyutlarda ve şekillerde görülmektedir. Trafik hacminin düşük olduğu düşük penetrasyonlu yüksek asfalt içeriğine sahip, ince agrega oranı yüksek BSK'lar daha çok hacimsel değişimlere sahip olduğundan büzülme çatlakları bu tip karışımlarda daha fazla olmaktadır [176].

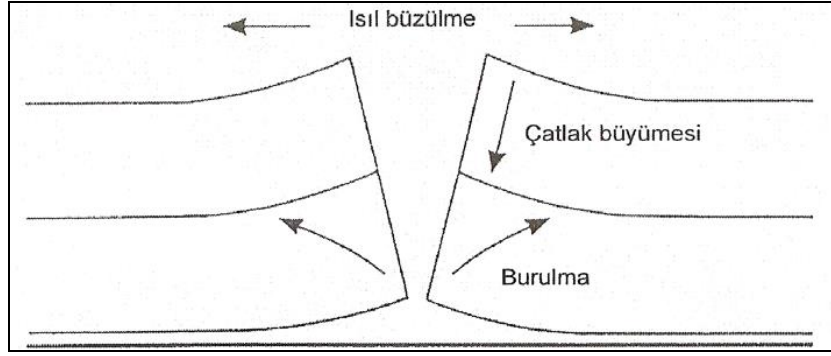
Hava koşullarının soğuk olduğu zamanlarda asfalt kaplamanın büzülmesi ve bitümlü bağlayıcının çok rijit bir hal alarak ağır taşıt trafiği yükleri altında gevrek davranışı ile düşük sıcaklık çatlakları oluşmaktadır. Enine büzülme çatlakları genellikle yol eksenine dik olarak görülmektedir. Düşük sıcaklık 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 sıcaklık çatlakları yüzeyde kılcal çatlak şeklinde başlar ve soğuma tekerrür sayısı ile ağır taşıt trafiğinin yoğunluğu ile zamanla derinliği artar [193].

Şekil 4.28'de düşük ısı çatlaklarının tipleri ve şiddeti görülmektedir.



Şekil 4.28. Düşük sıcaklık çatlakları şekilleri [193,201].

Şekil 4.29'da görüleceği üzere, soğuk havalarda üst kısımda aşırı büzülme ve alt kısımda daha az soğuk olması nedeniyle burulma oluşmaktadır. Bu durumda çatlaklar üst kısımda daha fazla açılmakta ve zamanla çatlak genişliği artarak derinleşmekte ve çatlak boyunca çatlağa dik dallanmış kılcal çatlaklar oluşmaktadır [193].



Şekil 4.29. Düşük sıcaklık çatlaklarının büyüme aşaması [201].

Tablo 4.9’da bozulma türleri ve nedenleri açıklanmıştır.

Tablo 4.9. Asfalt kaplama kusurları ve nedenleri [191].

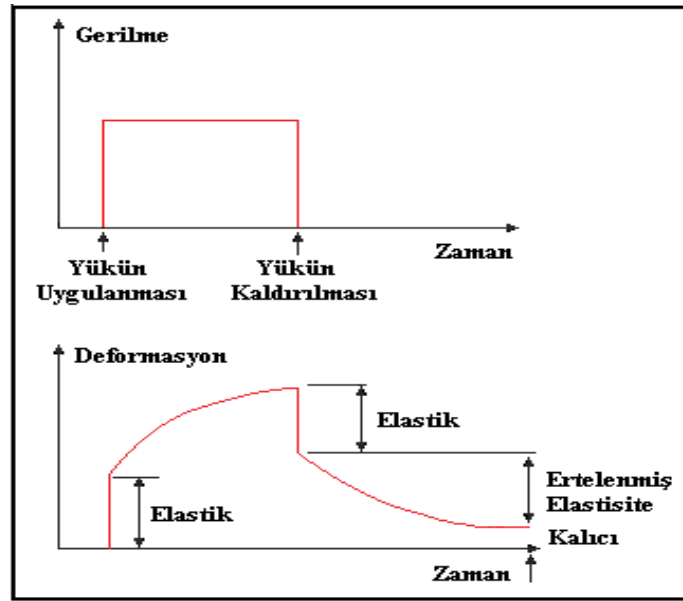
Kusurlar	Yapısal Bozulmalar	Karışım Kompozisyonu	Isı veya Rutubet Değişimi	Yapım Hataları
Timsah sırtı çatlak	✓			
Kenar çatlak	✓		✓	✓
Yansıma çatlak			✓	
Büzülme çatlak		✓		✓
Ötelenme çatlak				
Teker izi	✓	✓		✓
Ondülasyon	✓	✓		✓
Çökme	✓			✓
Kabarma/şişme			✓	
Çukur	✓	✓	✓	✓
Sökülme/Parçalanma		✓		✓
Terleme/Kusma		✓		✓
Agrega cilalanması		✓		
Agrega kaybı		✓		✓

5. BİTÜM MODİFİKASYONU

5.1. Modifikasyonun Amacı

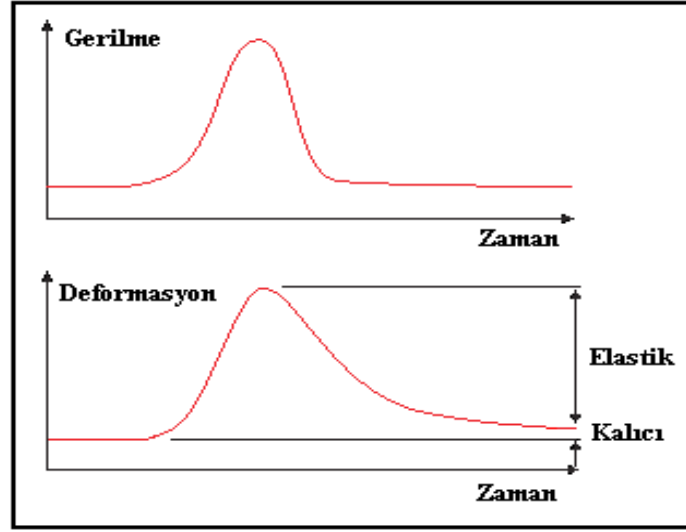
Bitüm, reolojik yapı olarak visko-elastik özellik göstermektedir. Başta çatlama ve kalıcı deformasyon dayanımı olmak üzere, yol performansının bir çok parametresinde büyük rol oynayan bitüm, asfalt karışımların da visko-elastik özellik göstermesine sebep olmaktadır. Genel olarak, asfalt kaplama yapısında oluşan deformasyon miktarı, yükleme süresine ve sıcaklık değerine bağlı olarak değişiklik göstermektedir.

Şekil 5.1 ve Şekil 5.2, esnek kaplamalara uygulanan yük sonucunda oluşan gerilme ve deformasyonların zamanla değişimini göstermektedir [206].



Şekil 5.1. Bitümün statik yükler karşısındaki davranışı [206].

Şekil 5.1.'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 visko-elastik 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 5.2. Bitümün dinamik yükler karşısındaki davranışı [206].

Şekil 5.2.'de, BSK'ların 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.

Artan trafik yükü altında yol kaplamalarının hizmet ömürlerinin kısalması modifiye bitüm ihtiyacını doğurmuştur. Bitümün iyileştirilmesi, doğal ve sentetik kauçukların bitüme belirli bir oranda karıştırılması ile gerçekleşir.

Modifiye bitüm uygulamaları ülkelere göre değişkenlik göstermekte ve araştırma çalışmaları devam etmektedir. Araştırma ve uygulama çalışmalarında karşılaşılan en önemli sorunlar;

- Polimer malzemelerin karışım sırası, (plentten önce bitüme / plent mikserinde sıcak karışım oluştururken)
- Uygulama gücü (karışım içersindeki oran / zamanlama)
- Laboratuvar deney sonuçları ile arazi şartlarının aynı sonucu vermemesi,
- Nitelikli işgücü
- Arazi performans testlerinin uzun zaman alması olarak ortaya çıkmaktadır.

Modifiye edici malzemeler olarak;

- Polimerler
- silikonlar

- Metal türleri
- Fillerler
- Lifler
- Sönmüş kireç
- Sülfür grupları ve kompleksleri kullanılmaktadır.

Modifiye bitüm uygulamalarının kullanım amaçları;

- Yorulma çatlaklarının kontrolü
- Su geçirimsizliği
- Adezyonun artırılması
- Gürültünün azaltılması
- Tekerlek yüküne bağlı oluk izlerinin azaltılması olarak özetlenebilir.

Modifiye bitüm dizaynı, kullanım amacına ve bölge iklim koşullarına göre oluşturulmalıdır. Asfalt modifiye dizaynı sadece deneylere dayalı sonuç alınabilecek bir çalışma olmayıp, uzun süreli kapsamlı saha araştırmalarını gerektirmektedir. Laboratuvar deney sonuçları ile arazi şartlarının aynı sonucu vermemesi nedeniyle, her arazi koşuluna göre en uygun modifiye dizaynının, zaman/performans faktörü dikkate alınarak geliştirilmesi gerektirmektedir [175,176].

5.2. Modifiyerlerin (Katkıların) Bitümlü Karışımlardaki Özellikleri

Bitüm modifiyerlerinin başlıca görevlerinden biri, bitümün veya BSK'nın farklı sıcaklıklardaki özelliklerine aksi tesirde bulunmadan, yüksek sıcaklık değerlerinde kalıcı deformasyon oluşumuna karşı dayanımı arttırmaktır. Bunun için birinci yol, BSK'nın toplam visko-elastik deformasyonunu azaltmak amacıyla bitümü sertleştirmek, ikinci yol ise bitüm içerisindeki toplam viskoz öge oranını azaltmak amacıyla elastik ögelerin oranını arttırmaktır. Bitüm sertliğinin artırılması, aynı zamanda BSK'nın da sertliğinin artmasını sağlamaktadır. Böylelikle kaplama yapısı dayanımında, malzemelerin yük dağıtma yeteneğinde ve kaplamadan hedeflenen dizayn ömründe artış elde edilebilmektedir. Aynı etki, kaplama tabakaları kalınlıklarının artırılmasıyla da elde edilebilmektedir. Fakat bu yöntem ilk inşaat maliyetinin yüksek olmasına neden olmaktadır. Bitüm bünyesindeki elastik öge oranının yükseltilmesi, çekme deformasyonu bakımından önemli olan kaplama esnekliğinde artış sağlamaktadır [206].

5.3. Katkı Maddelerinin Kullanım Yöntemleri

Modifiyerlerin kullanım bakımından ekonomik ve kolay olarak uygulanması bakımından bazı şartları sağlaması gerekmektedir [207].

- Bitümle karıştırma sıcaklıklarında bozulmama,
- Ekonomik olarak temin edilme,
- Kolay bir şekilde bulunma,
- Bitümle karışım bakımından bir engel bulunmama,
- Karıştırma ve serme sıcaklıklarında bitüme fazla viskoz özellik, serme, sıkıştırma ve hizmet sıcaklıklarında ise kırılgan ve aşırı rijit davranış sağlamama gibi koşullara sahip olması gerekmektedir.

Modifikasyon işlemi 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 [170].

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

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. Hazırlanan bağlayıcının kontrol edilebilmesi nedeniyle bağlayıcının modifiye edilmesi yöntemi kullanım açısından daha ön plana çıkmaktadır [170].

5.4. Bitüm Katkı Maddelerinin Sınıflandırılması

Bitüm katkı maddeleri çeşitli şekillerde sınıflandırılabilir. Katkı maddesinin tipini, örneklerini ve katkı maddesinin kıvamına etkisini gösteren genel bir sınıflandırma Tablo 5.1.'de verilmiştir.

Tablo 5.1. Bitüm katkı maddelerinin genel sınıflandırılması [170].

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	Polimerler - 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

Kullanımı oldukça artan modifiye bitümler ve karışımlar konusundaki çalışmalarda son yıllarda polimerler temel alınarak; Tablo 5.2'deki gibi polimer olan katkı maddeleri ve polimer olmayan katkı maddeleri şeklinde sınıflandırmada yapılmaktadır.

Tablo 5.2. Bitüm modifikasyon tipleri [170].

Modifikasyon Tipleri	Örnekler
I. Polimer Olmayan Katkıyla Modifikasyon a. Fillerler b. Soyulma Önleyici Katkılar c. Genleştiriciler (Ekstendenler) d. Antioksidanlar e. Organo-metal Bileşimleri f. Diğerleri	Kil, Siyah Karbon , Uçucu Kül Organik Aminler ve Amidler Ligrin ve Sülfür Çinko ve Kurşun Antioksidanları, Fenolikler, Aminler Organo Manganerz Bileşimleri Organo Karbon Bileşimleri
II. Polimer Katkıyla Modifikasyon a. Plastikler 1. Termoplastikler 2. Termosetler b. Elastomerler 1. Doğal Kauçuklar 2. Yapay Elastomerler 3. İşlenmiş Kauçuklar 4. Fiberler	Polietilen (PE), Polipropilen (PP), Polivinil Klorid (PVC), Polistiren (PS), Etilen Vinil Asetat (EVA) Epoksi Reçineler Sentetik Butadien kopolimer (SBR), Stiren Butadien Stiren Kopolimer (SBS), Etilen Prokplendien Harmoliper (EPDM), İsobüten İsopren Kopolimer (IIR) Polyester, Fiberler, Polipropen Fiberler
III. Kimyasal Reaksiyon Modifikasyonu	Katkı Reaksiyonu (bitüm + monomer) Volkanizasyon (bitüm + sülfür) Nitrosyon Reaksiyonu (bitüm + nitrik asit)

Bitüm ve bitümlü karışımların modifikasyonunda kullanılan katkı maddeleri ve bozulma şekillerine göre sağladıkları faydalar Tablo 5.3'te gösterilmiştir.

Tablo 5.3. Farklı tipteki modifiyerlerin sağladıkları faydalar [206].

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

5.5. Modifiye Bitüm Tipleri ve Teknik Özellikleri

Tüm dünyada olduğu gibi Türkiye’de de kaplama performansını arttırmak, yapım ve bakım masraflarını azaltmak amacıyla modifiye bitümler kullanılmaktadır. Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM), BSK kaplama tabakalarında yaygın olarak görülen tekerlek izi ve çatlak şeklindeki bozulmaları geciktirmek ve kaymaya karşı direnci artırarak trafik güvenliğini sağlamak amacıyla, Modifiye Bitüm Teknik Şartnamesi’ni hazırlamıştır.

Tablo 5.4’te KGM modifiye bitüm şartname limitleri verilmiştir.

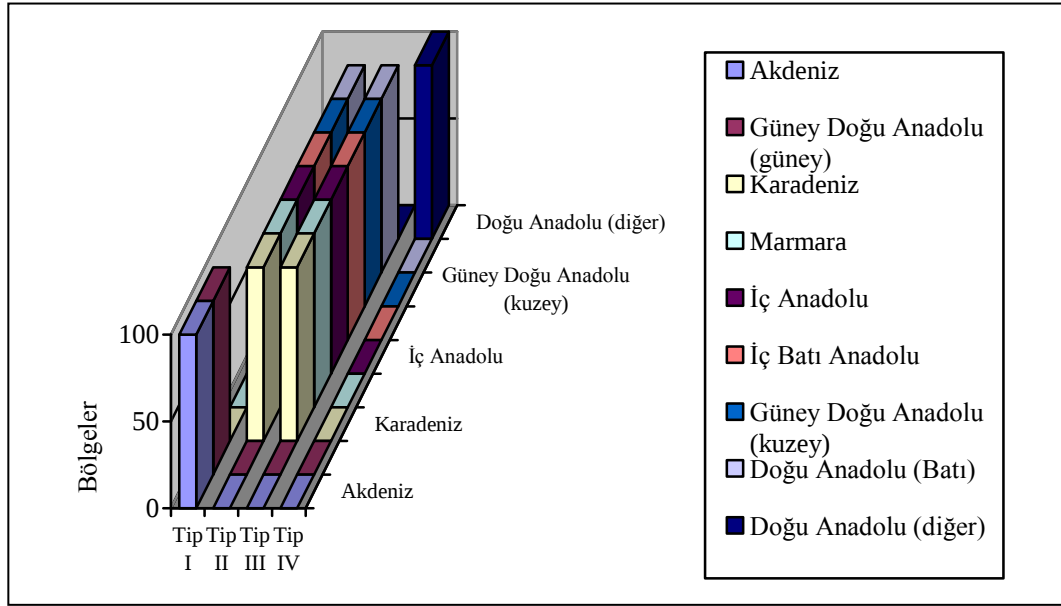
Tablo 5.4. KGM modifiye bitüm şartname limitleri [166].

Sıra No	Deney Adı	Standart	Şartname Limitleri			
			Tip - 1	Tip - 2	Tip – 3	Tip – 4
1	Penetrasyon (25 °C,, 0,1 mm min.	TS 118 EN 1426	20	20	40	60
2	Düktilite (25 °C, 5 cm/dk.), cm min.	TS 119	10	60	80	100
3	Yumuşama Noktası (R/B), °C	TS 120 EN 1427	65-75	65-75	60-70	50-60
4	Fraas Kırılma Noktası, °C min.	TS EN 12593	-8	-12	-15	-20
5	Elastik Geri Dönme (25 °C), % min.	EN 13398	25	50	50	50
6	Parlama Noktası, °C min.	TS 123	200	200	200	200
7	Özgül Ağırlık	TS 1087	1,0-1,1	1,0-1,1	1,0-1,1	1,0-1,1
8	Depolama Stabilitesi	EN 13399				
8.1	-Yumuşama Noktası Farkı, °C maks.		4	4	4	4
8.2	- Penetrasyon Değeri Farkı, °C maks.		5	5	8	8
9	İnce Film Halinde Isıtma Deneyi (163°C’de 5 saat)	TS 121				
9.1	-Kütle Kaybı, % maks.		1	1	1	1
9. 2	-Yumuşama Noktasındaki Değişiklik artma, °C maks. azalma, °C maks.	TS 120 EN 1427	7 2	7 2	7 2	7 2
9. 3	-Penetrasyondaki Değişiklik azalma, % maks. artma, % maks.	TS 118 EN 1426	40 10	40 10	40 10	40 10
9. 4	-Düktilite (25 °C, 5 cm/dk.), cm min.	TS 119	5	30	50	80
9. 5	-Elastik Geri Dönme (25 °C), % min.	EN 13398	25	50	50	50

Modifiye bitüm seçilirken serileceği bölgenin iklim koşulları ve bitümlü kaplama tiplerine bağlı olarak belirlenecektir.

TS 1081 EN 12591’e göre ülkemizde genel olarak Akdeniz ikliminin hüküm sürdüğü bölgelerde ve Güney Doğu Anadolu’nun güney kesimlerinde B 40/60, B 50/70 sınıflarında Tip I, Karadeniz, Marmara, İç Anadolu, İç Batı Anadolu, Güney Doğu Anadolu’nun kuzeyi ve Doğu Anadolu’nun batı kesimlerinde B 50/70 sınıfında Tip II ve Tip III, Doğu Anadolu’nun soğuk ve yüksek kesimlerinde B 70/100 sınıfında Tip IV bitüm kullanılmaktadır [248].

Şekil 5.3'te bölgelere göre modifiye bitüm tipleri karşılaştırılmıştır.



Şekil 5.3. Bölgelere göre modifiye bitüm kullanım tipleri

5.6. Polimer Olmayan Katkılarla Bitüm Modifikasyonu

Yol üst yapısında stabiliteyi ve servis ömrü boyunca oluşabilecek kalıcı deformasyonlara karşı dayanımı arttırmak için bitüm modifikasyonunda polimer olmayan sülfür, organo-manganez bileşikleri ve kükürt gibi katkılarda kullanılmaktadır.

5.7. Polimer Katkılarla Bitüm Modifikasyonu

Gelişmekte olan ülkeler gelişme planları sağlamak için uzunluk ve kalite açısından daha yüksek seviyeli ulaşım sistemlerine ihtiyaç duymaktadır. Gelecekteki ihtiyaçları karşılamak için düşük bakım, daha iyi sürüş kalitesi ve hızlı yapım için yeni ürünler, makineler ve metotları içeren büyük projeler yapılmaktadır.

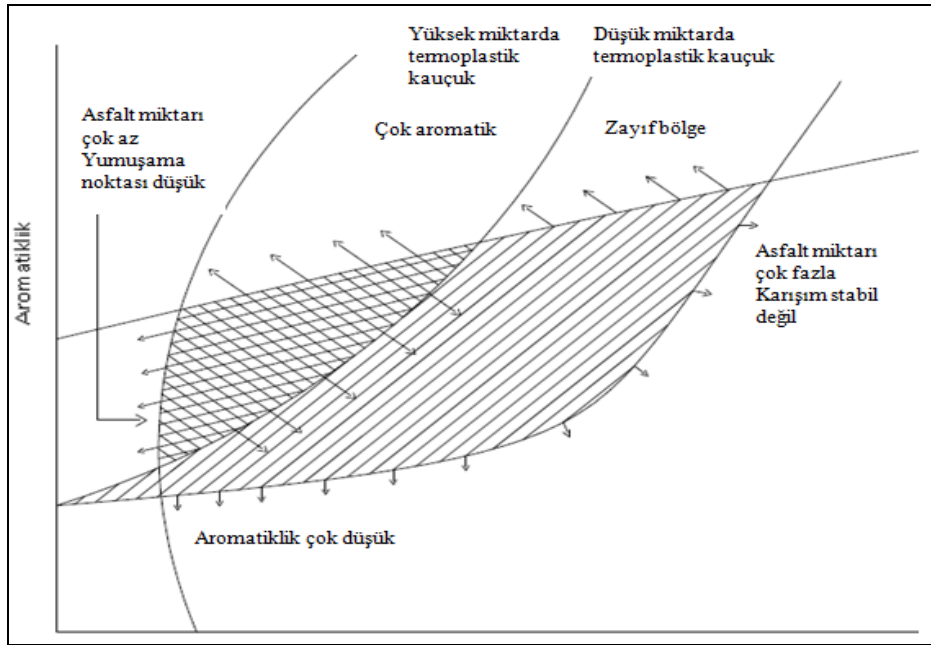
Son 20 yılda trafikteki artış, kamyonlardaki aşırı yükleme, günlük ve mevsim sıcaklıklarında bariz değişim; asfalt yüzeyinde ondülasyon, çatlama vb. olumsuzluklara sebep olmuştur. Çok yüksek veya çok düşük kaplama sıcaklığı da ilave bir faktör olabilir. Rafinelerinden elde edilen bitüm mevcut şartnameleri sağlamakla beraber, arazide arzu edilen performansı göstermeyebilir.

Bitüm ve karışımların özellikleri, organik polimer ve kauçuk gibi katkı karışımlarının ilavesi ile geliştirilebilir. Bunların avantajları bazı araştırmacılar tarafından gösterilmiştir.

5.7.1. Kauçuk İlaveli Bitüm Modifikasyonu

Polibutadien, polisopren, doğal kauçuk, bütül kauçuk, klorofin, düzensiz strene-butadien-kauçuk gibi bileşenlerin çoğu bitüm ile birlikte kullanılmakta olup, başlıca etkileri viskoziteyi arttırmaktır. Yüksek sıcaklıklarda bitüme katılarak kullanılmaktadır.

Şekil 5.4'te modifiyeli asfaltların aromatiklik durumu incelenmiştir.



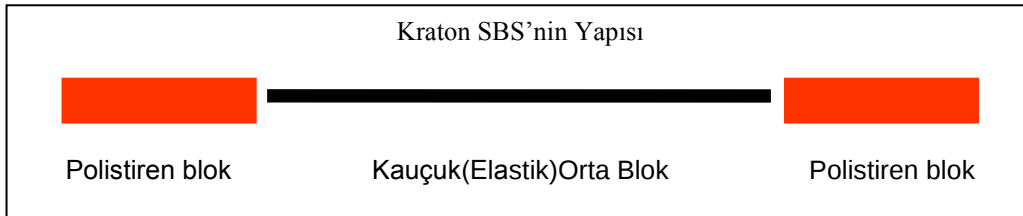
Şekil 5.4. Termoplastik kauçuk modifiyeli asfaltların aromatiklik durumu [186,191].

5.7.2. Bitüm Modifikasyonunda Stiren-Butadien-Stiren (SBS) Blok Kopolimer Kullanımı

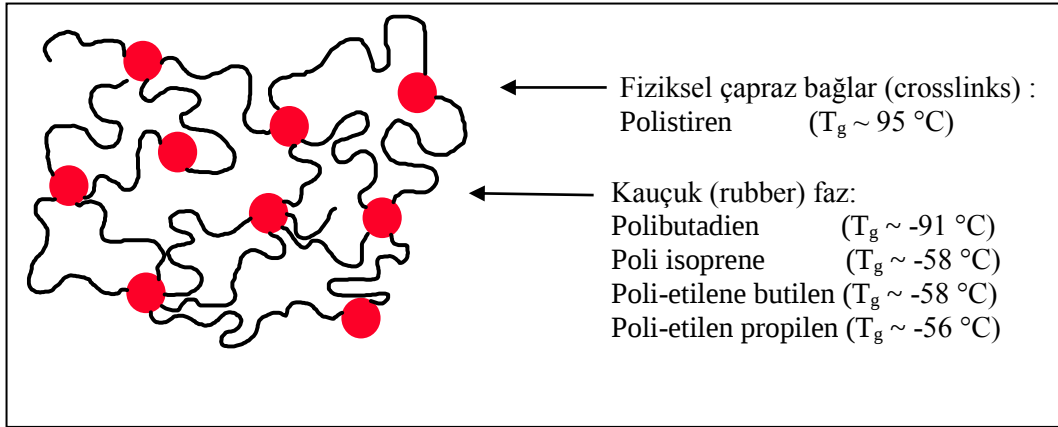
SBS, Stiren-Butadien-Stiren Blok Kopolimerinin kısaca adlandırılmasıdır. Shell firması tarafından 1960'larda yapılan petrokimya türevi bu sentetik kauçuk ailesi, ayakkabı tabanı, su yalıtım membranı, polimer ve bitüm modifikasyonu, hot-melt yapıştırıcılar gibi endüstriyel birçok alanda hammadde olarak kullanılmaktadır. SBS, esnek kaplamalarda 1985 yılından beri kullanılmaktadır. 16 yıllık süre içerisinde kullanımdaki büyük artış

sonucu 2001 yılında yol sektöründe 125.000 ton SBS tüketilmiştir. Kraton D 1101 ticari ismine sahip SBS 'in yapısı lineer bir yapıya sahiptir.

Şekil 5.5'te kraton SBS yapısı ve Şekil 5.6'da SBS türü polimerlerin yapısı açıklanmıştır [205].



Şekil 5.5. Kraton SBS yapısı [205].



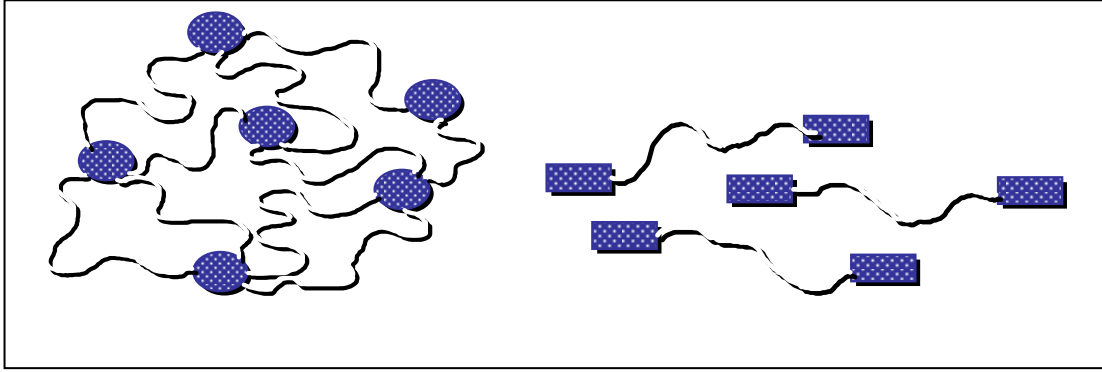
Şekil 5.6. SBS türü polimerlerin yapısı [205].

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 $+80^\circ\text{C}$ 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 Şekil 5.7'deki gibi tekrar oluşmaktadır. Bu yapı karışıma volkanize kauçuk kadar sağlamlık vermektedir.



Şekil 5.7. Bitümle karışım sıcaklığında ve düşük sıcaklıklarda SBS'in yapısı [205].

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 olmuştur.

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 bulunmaktadır.

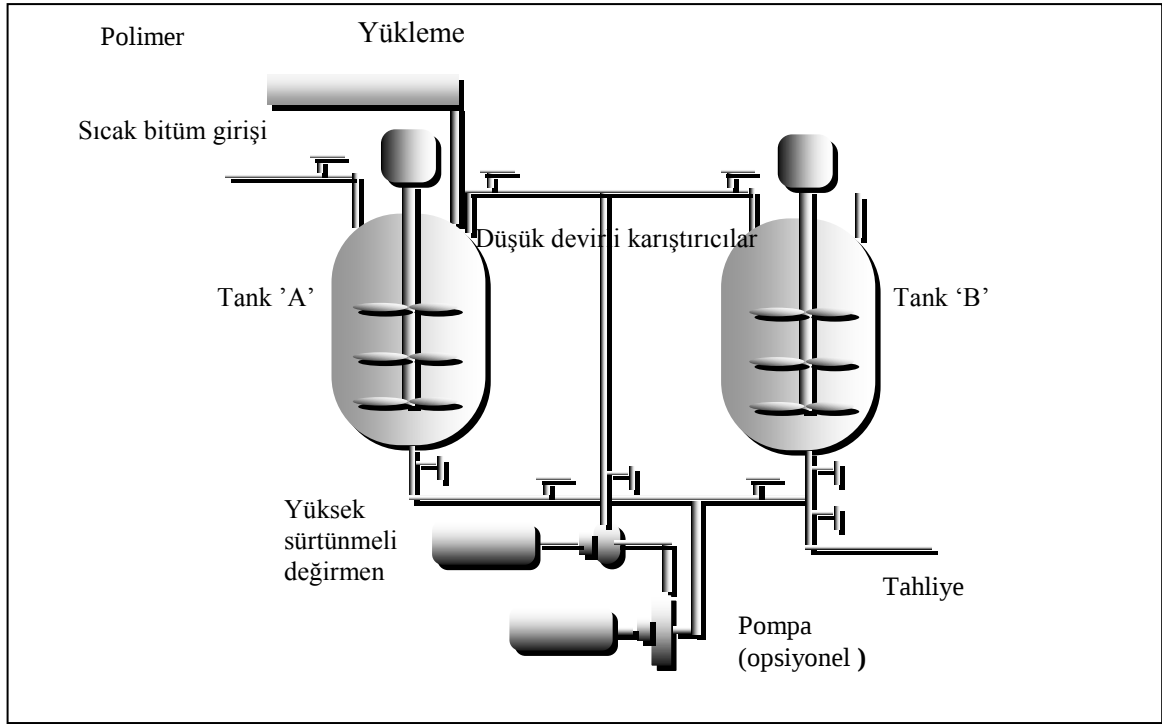
Bu faktörler;

- 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.

Çözünme tamamen olduktan sonra karışımın bir süre olgunlaşması için beklenmesi tavsiye edilmektedir. Böylece SBS'in bitümün tüm uygun bileşenlerini bünyesine alması sağlanmaktadır [205].

Şekil 5.8'de SBS modifikasyonunda kullanılan ekipman gösterilmiştir.



Şekil 5.8. SBS modifikasyonunda kullanılan ekipman [205].

Hazırlanan PMB agregayla karıştırıldıktan sonra serme ve sıkıştırması mevcut ekipmanlarla yapılır. Bu işlemler sırasında tavsiye edilen 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'li bitümün kullanılmaması durumunda bozulmayacağı, kısa süreli (birkaç günden 1–2 haftaya kadar) depolama yapılması gerektiğinde 130–140°C sıcaklıkta karışımın düşük devirli karıştırıcı ile sürekli karıştırılarak homojen tutulması gerektiği, daha uzun süreli depolama gerektiğinde ise karışımın soğutulup daha sonraki kullanımlar için saklanabileceği ayrıca SBS'in bitüm içinde tamamen çözünmesi sağlandığı takdirde pratikte bir sorunla karşılaşılmayacağı üretici firma tarafından belirtilmektedir.

Tablo 5.5'te Kraton SBS'ler ve tipleri verilmiştir.

Tablo 5.5. Kraton SBS ve tipleri [205].

Kraton SBS	Tipleri
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 5.6’da karşılaştırılmıştır.

Tablo 5.6. Kraton D 1101 ve D 1192 SBS türlerinin özellikleri [205].

Özellik	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 toksin 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 çıkmamasına dikkat edilmelidir. Bu sıcaklıklar aşılsa yangın riskine karşı tedbirler alınmalıdır [205].

5.7.2.1. SBS Polimer Katkılı Bitümlerin Özellikleri

Bitümde katkı maddesi olarak kullanılan Stiren Butadien Stiren (SBS) polimer katkıları BSK karışımların fiziksel ve mekanik özelliklerinde olumlu sonuçlar verdiğinden en çok tercih edilen katkı malzemelerinden biridir.

Şekil 5.9'da SBS katkı maddesi ve üç boyutlu yapısı gösterilmiştir.

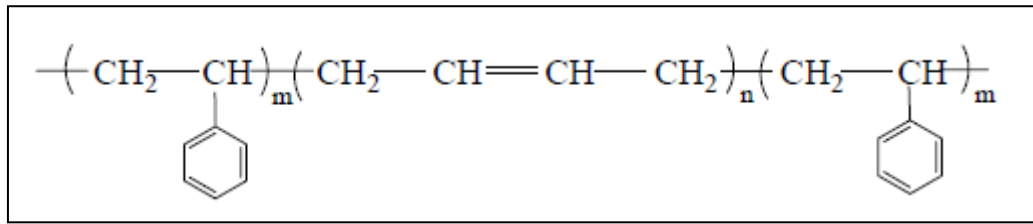


Şekil 5.9. SBS katkı maddesinin genel görünümü ve üç boyutlu SBS yapısı [197].

SBS katkılar bağ şekilleri olarak gelişigüzel, blok, stiren, butadien ve liner olarak değişik hallerde bulunmaktadır. SBS katkılara ait bağ şekilleri ve moleküler yapısı Şekil 5.10 ve Şekil 5.11’de gösterilmiştir.



Şekil 5.10. SBS bağ şekilleri [197].



Şekil 5.11. SBS moleküler yapısı [210].

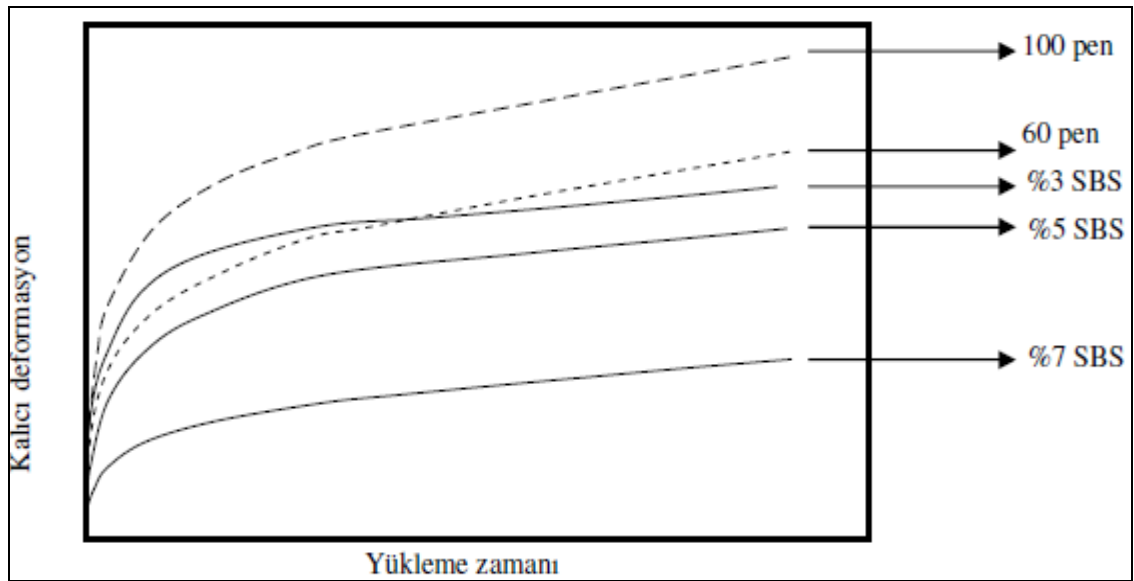
Amsterdam’da bulunan Shell Araştırma ve Teknoloji Merkezinin laboratuvarlarında SBS ile karıştırılmış Türk bitümleri üzerine bazı değerlendirmeler yapılmış, bunların SBS değişimine uygun olup olmadıkları araştırılmıştır.

Tablo 5.7’de bu değerlendirmeden elde edilen sonuçlar verilmektedir [197].

Tablo 5.7. Türk bitümlerinin değerlendirilmesinden elde edilen sonuçlar [197].

Değerlendirme		Katkısız Bitüm	Katkısız Bitüm + %6 SBS (Kraton D 1101CM)
Yumuşama noktası, °C		45	79,5
25 °C’de pen, 0,1 mm		98	55
Dinamik viskozite mPa	100 °C	2370	
	120 °C	690	2730
	150 °C	160	900
	180 °C		330
Fraas kırılma sıcaklığı, °C		-17	-17
13 °C’de, cm Düktilite		>100	>100
13 °C’de Düktilite özelliğinin geri dönüşü, %		10	90

Laboratuvar deneyi olarak 40°C’de yapılan dinamik sünme deneyinde normal ve değişik oranlardaki SBS katkılı BSK’lardaki yükleme zamanına bağlı deformasyon değişimleri Şekil 5.12’de verilmektedir [197].



Şekil 5.12. 40°C’de dinamik sünme deneyinde zaman-kalıcı deformasyon ilişkisi [197].

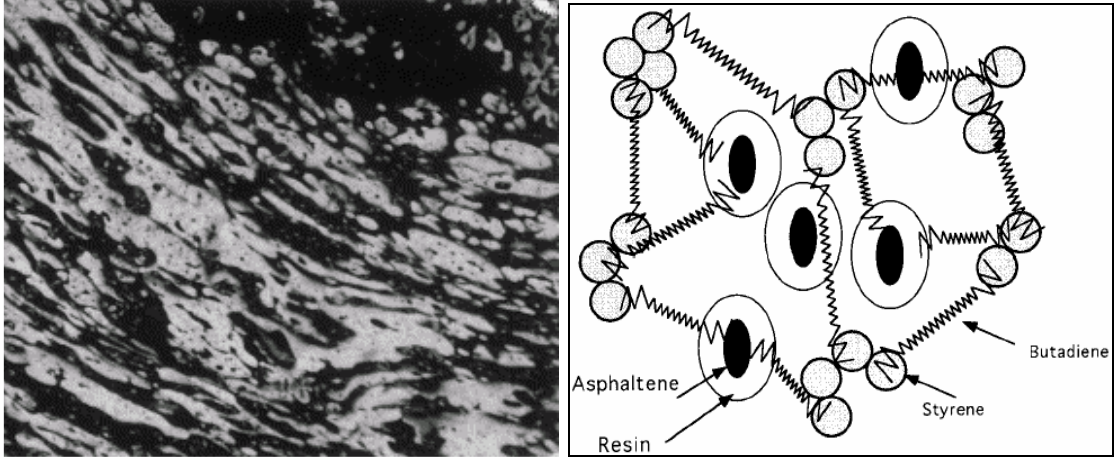
Sünme deneyinde yükleme zamanına bağlı kalıcı deformasyon miktarı modifiyeli bitümlerdeki SBS miktarı artışına bağlı olarak azalmaktadır.

Şekil 5.13’te asfaltla kaplanmış SBS moleküllerinin üç boyutlu görünümü verilmiştir.



Şekil 5.13. Asfaltla kaplanmış SBS moleküllerinin üç boyutlu görünümü [197].

SBS kaplı asfalt filmine ait optik fotomikrografik yapı ile asfaltten hücre şeklinde ve stiren butadien bağlarından oluşan SBS modifiyeli bitümün yapısı Şekil 5.14'te gösterilmiştir.



Şekil 5.14. SBS kaplı asfalt filminin fotomikrografik gösterimi ve bağ yapısı [210,211].

6. DENEYSEL ÇALIŞMA YÖNTEMLERİ

6.1. Bağlayıcı Deneyleri

Asfalt bağlayıcının fiziksel özelliklerine yönelik çalışma kapsamında bir dizi deney yapılmıştır. Bağlayıcı deneyleri olarak; penetrasyon, yumuşama noktası, duktilite, özgül ağırlık ve Frass kırılma noktası testleri uygulanmıştır. Deneylerde, katkılı ve katkısız asfalt bağlayıcı numunesi deney sonuçları karşılaştırılarak, şartname limitlerine uygun olup olmadıkları ve BSK’larda kullanılabilme durumları tespit edilmiştir.

6.1.1. Penetrasyon Deneyi (TS 118 EN 1426)

Penetrasyon deneyi, asfalt kıvamının ampirik bir ölçümüdür. Bitümün sertliğini veya kıvamını belirlemek amacıyla yapılmaktadır. Deney başlangıcında asfalt çimentosu kabı, standart deney sıcaklığına gelineye kadar ısıtılmaktadır. Standart penetrasyon deneyi, 100gr. ağırlığındaki bir iğnenin 25°C sıcaklıkta ve 5 sn. süreyle bitüm içerisinde battığı düşey mesafe olarak tanımlanmaktadır [191,212].

Penetrasyonun birimi 10^{-1} mm’dir. Bitümün penetrasyon değeri kıvamla ters orantılıdır. Penetrasyon deney aleti Şekil 6.1’de gösterilmiştir.



Şekil 6.1. Penetrasyon deney aleti

6.1.2. Yumuşama Noktası Deneyi (TS 118 EN 1427)

Bitümün yumuşama sıcaklığını tespit etmek amacıyla yapılan bir deneydir. Bu deneyde, standart kalınlık ve çapta bir halka içine ısıtılarak akıcı hale gelen bitüm bırakılarak ve numune örneği düzeneğine yerleştirilmiştir. Metal halka içindeki asfalt numunesi üzerine standart ağırlık ve çapta bilye yerleştirilmekte ve su içinde belirli bir hızda ısıtılmaktadır. Deney başlangıç sıcaklığı 5°C'dir ve deney boyunca sıcaklık dakikada 5°C arttırılmaktadır. Yumuşama noktası değeri, bitümlü malzemenin tabana değdiği anda termometrenin gösterdiği değerdir [175,213].

Otomatik yumuşama noktası deney aleti ve aparatları Şekil 6.2'de gösterilmiştir.



Şekil 6.2. Yumuşama noktası deney aleti

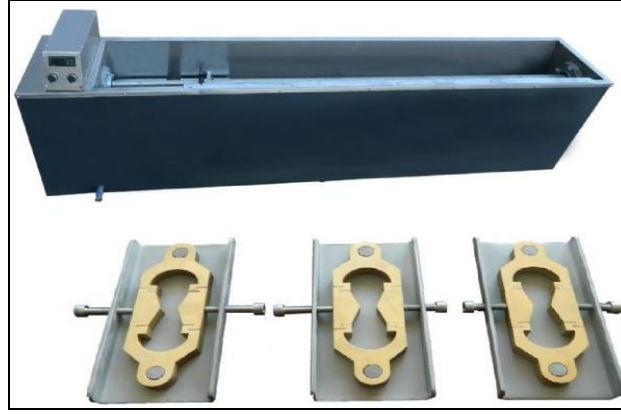
6.1.3. Düktilite Deneyi (TS 119)

Düktilite deneyi, standart koşullar ve boyutlar altında asfalt çimentosu briketi, ısıtılıp akıcı hale geldikten sonra bir kalıba dökülmekte ve çekme deneyi ile ölçülmektedir. Deneye hazır haldeki kalıptaki numuneler normalde 25°C olan standart deney sıcaklığına getirilmektedir. Briketin bir parçası normalde dakikada 5 cm'lik bir hızla, numunenin iki parçasını birbirine bağlayan asfalt bandı kopana kadar diğerinden çekilmektedir. Malzeme bandının koptuğu andaki uzama santimetre olarak asfaltın düktilitesidir [191].

Düktilite arttıkça adezyon, çekme mukavemeti ve deformasyon artarken, ısıya duyarlılık azalmaktadır. Düktilitenin azalmasıyla düşük ısılarda büzölmeler artmaktadır [176].

TS 119'a göre asfalt uzama miktarının 100 cm'den büyük olması istenmektedir. Mevcut Standartlarda düktilite deneyi yer almamaktadır.

Şekil 6.3'te düktilite deney cihazı ve aparatları bulunmaktadır.



Şekil 6.3. Düktilite deney aleti ve aparatları

6.1.4. Frass Kırılma Noktası Deneyi

Bu deney, asfaltın (-30°C)'ye kadar olan düşük ısılardaki davranışını belirlemek amacıyla uygulanmaktadır. Deney cihazında bulunan çelik levha üzerine 0,5 mm kalınlıkta asfalt filmi konarak 1°C/dk. hızla ısı düşürülerek çatlak oluşum ısısı saptanmaktadır. Frass kırılma noktası ısısı $2,1-2,7 \cdot 10^9$ Pa viskozluğa sahip olup, asfalt penetrasyonunun 1,25 olduğu ısıdır [175].

Frass kırılma deneyinde kullanılan deney aparatları Şekil 6.4'te verilmiştir.



Şekil 6.4. Frass kırılma noktası aparatları

6.1.5. Asfalt Bağlayıcı Özgöl Ağırlık Deneyi

Karışım hesaplarında, hidrokarbonlu bağlayıcının cinsinin belirlenmesinde ve ağırlıkla hacim arasındaki bağıntılarda asfaltın özgöl ağırlığının bilinmesi gerekmektedir.

Asfalt bağlayıcı özgöl ağırlığı, belli hacimdeki ağırlığının aynı hacimdeki su ağırlığına oranı olarak tespit edilmektedir. Deneyin yapılışında piknometre metodu uygulanmaktadır. Boş kap, kuru olarak tartılır, sonra su ile doldurularak tartılır. Kullanılacak suyun saf ve 25°C’de olmasına dikkat edilmelidir. Daha sonra kuru boş kabın içine içinde hava kabarcığı kalmayacak şekilde 2/3 oranında erimiş asfalt tartılır. Son olarak 2/3’ün üstü asfaltla dolu piknometrenin üzeri su ile doldurularak tartım yapılarak tartım sonucu oranlarından faydalanarak piknometre metoduna göre asfalt özgöl ağırlığı hesaplanır.

Asfaltın özgöl ağırlığı 1,0 civarındadır [165].

Özgöl ağırlık hesaplaması Formül 6.1’de verilmiştir.

$$\text{Özgöl ağırlık} = Dp = \frac{C - A}{B - A - (D - C)} \quad (6.1)$$

Kap: A

Kap+su: B

Kap+asfalt: C

Kap+asfalt+su: D

6.2. Agrega Deneyleri

Deneyisel çalışmalar kapsamında, agrega özgöl ağırlıkları, aşınma deneyi, agrega gradasyonu, yassılık indeksi tayini, agregaların kırılmışlık yüzdesi, hava tesirlerine karşı dayanıklılık testleri yapılmıştır.

6.2.1. Agrega Özgöl Ağırlıkları

Bir maddenin 25°C’deki yoğunluğunun, 1,0 gr/cm³ olan suyun yoğunluğuna oranı olarak ifade edilir.

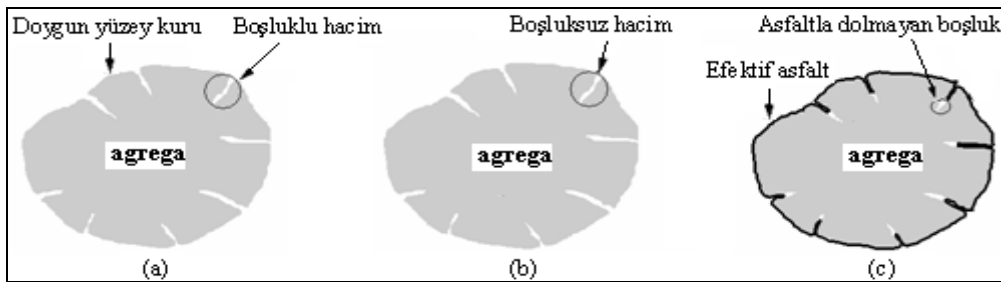
Mineral agregası, poroz veya gözenekli olması sebebiyle belirli değ rlere kadar suyu ve asfaltı absorbe edebilir. Ayrıca, her agreganın absorbe ettiği su ve asfalt oranı birbirinden farklı olacaktır. Agregaların özgül ağırlıklarının ölçülmesinde kullanılan üç yöntem bu farklılığı göz önüne almaktadır. Kullanılan bu yöntemler hacim, zahiri ve efektif özgül ağırlıklardır [189,196,214].

Şekil 6.5'te özgül ağırlık ölçüm cihazı ve aparatları yer almaktadır.



Şekil 6.5. Özgül ağırlık ölç r elektronik terazi

Şekil 6.6'da agregası özgül ağırlık hesaplamalarında boşluklar dikkate alınarak esas alınan hacim değ rleri görülmektedir.



Şekil 6.6. Agreganın hacim (a), zahiri (b) ve efektif (c) özgül ağırlık hacimleri [196].

6.2.2. Los Angeles Aşınma Deneyi

Numune, şartnamede belirtilen aşınma sınıfına göre uygun olan eleklerden elenip, her elek üzerinde kalan agregası, kil ve tozdan iyice temizleninceye kadar kaldığı elek üzerinde

yıkanır. Agregalar suyla temizlendikten sonra etüvde $110\pm5^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta sabit ağırlığa kadar kurutulup, kaldıkları eleklerden tekrar dikkatle elenir. Bu şekilde hazırlanan deney numuneleri Los Angeles aşınma cihazına şartnamede belirtilen aşınma sınıfına göre uygun sayıdaki demir bilye ile birlikte konarak cihazın ağzı kapatılır.

Agrega aşınma deneyi test cihazı Şekil 6.7'deki gibidir.



Şekil 6.7. Agreg a aşınma deneyi test cihazı

AASHTO T96 veya ASTM C131 standardı uygulanarak bir agreg a yığının daki kayıp malzeme yüzdesi tespit edilerek bu deney metoduyla agreganın dayanıklılığı tespit edilmektedir.

Aşınma sınıfına bağı lı deneyde kullanılacak malzeme miktarları Tablo 6.1'de gösterilmiştir.

Tablo 6.1. Aşınma sınıfına göre küre sayısı [176].

Sınıfı	Küre Sayısı	Yükleme (gr.)
A	12	5000 ± 25
B	11	4584 ± 25
C	8	3330 ± 25
D	6	2500 ± 25
E	12	5000 ± 25
F	12	5000 ± 25
G	12	5000 ± 25

Cihaz dakikada 30-33 devir yapmakta olup, A,B,C,D sınıfları için 500; E,F,G sınıfları için 1000 devir yaptırılır. Daha sonra numune alınıp 1.70mm elekten elenir. Elek üzerinde kalan tartılır [215].

Tablo 6.2’ye göre aşınma sınıfı ve elek açıklıklarına göre devir sayısı ve kullanılan numunelerin miktarı yer almaktadır.

Tablo 6.2. Granülometri sınıfları ve gerekli numune miktarı [176].

Elek Açıklığı		Aşınma Sınıfları						
Geçtiği Elek (mm)	Kaldığı Elek (mm)	A	B	C	D	E	F	G
75	63					2500		
63	50					2500		
50	37,5					5000	5000	
37,5	25	1250					5000	5000
25	19	1250						5000
19	12,5	1250	2500					
12,5	9,5	1250	2500					
9,5	6,3			2500				
6,3	4,75			2500				
4,75	2,36				5000			
TOPLAM		5000 ± 10	5000 ± 10	5000 ± 10	5000 ± 10	10000 ±100	10000 ±75	10000 ±50
DEVİR SAYISI		500	500	500	500	1000	1000	1000

Aşınma yüzdesi oranı Formül 6.2’de gösterilmiştir.

$$\text{Aşınma Yüzdesi} = \left[(A - B) / A \right] * 100 \quad (6.2)$$

Numunenin ilk ağırlığı (gr.) = A

Numunenin son ağırlığı (gr.) = B

Tablo 6.3’te agrega danesi aşınma limitleri karşılaştırması yapılmıştır.

Tablo 6.3. Los Angeles agrega danesi aşınma limitleri [216].

Trafik (ETDY), milyon	Kaplanmış Kaba Agrega, maks. %	Kaplanmamış Kaba Agrega, maks. %
<1	50	50
<10	45	50
<100	40	50
≥100	35	50

6.2.3. Agregada Gradasyonu

Agrega gradasyonu, toplam ağırlığın yüzdesi olarak dane boyutlarının dağılımını ifade etmektedir. Gradasyon, malzemenin çapı büyükten küçüğe doğru delikler içeren bir dizi elekten geçirilerek ve her elekte kalan malzeme miktarının ağırlığının ölçülmesiyle gerçekleştirilmektedir.

Şekil 6.8’de elek analizinde kullanılan aparatlar yer almaktadır.



Şekil 6.8. Agregada elek analizi titreşim cihazı ve elek seti takımı

BSK’larda istenilen bir kalitede kaplama elde edilmesi, agrega kontrolünün sağlanması, yerel olarak bulunan malzemeden optimum şekilde yararlanma ve boyutların standart hale getirilip, maliyetlerin azaltılması ihtiyacından dolayı agrega gradasyon şartnamesi geliştirilmiştir [173].

Şekil 6.9’da agregaların temin edildiği konkasör şantiyesindeki taş kırma makineleri ve bant takımları görülmektedir.



Şekil 6.9. Agregat konkasör şantiyesi

6.2.4. Yassılık İndeksi Tayini Deneyi

Yassı ve uzun danelerin tespiti ASTM D4791 standardı uygulanarak tespit edilir ve 4.75mm'den büyük kaba agregalara uygulanır [176,196,208,216,217].

Kaba agregat danelerinin maksimum boyutunun minimum boyuta oranının beşten büyük kısmının ağırlıkça yüzdesini ifade etmektedir [176].

Agregat daneleri şekil olarak ince uzun ve yassı miktarının olmaması veya çok az miktarda olması istenmektedir. Çünkü; yassı danelerden oluşan bir yapı, trafik yükü altında stabil davranış göstermemektedir. Yassı daneler yük altında kolay kırılabilirdiğinden dolayı karışım mukavemetini azaltmaktadır.

Tablo 6.4'te yassı ve uzun dane kriterler yer almaktadır.

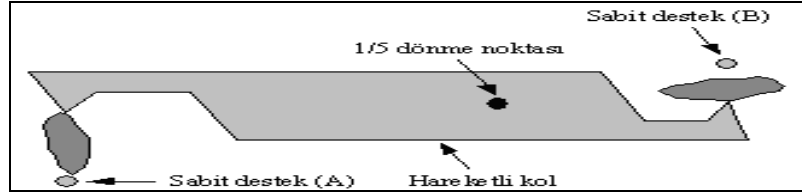
Tablo 6.4. Yassı ve uzun daneler kriteri [189,196].

Trafik (ETDY), milyon	Maksimum, %
<0.3	-
<1	-
<3	10
<10	10
<30	10
<100	10
≥100	10

Deneyde, yassı ve uzun dane tespiti için en büyük boyuttaki agregat sol taraftaki hareketli kol ile sabit A desteği arasına yerleştirilir ve hareketli kol sabitlenir. Aynı agregat

danesi sol taraftan alınarak sağ taraftaki boşluğa yerleştirilmeye çalışılır. Şayet agregadanesi bu boşluktan geçebiliyorsa yassı ve uzun dane olarak kabul edilir ve kusurlu olarak değerlendirilir.

Şekil 6.10’da yassı ve uzun dane ölçme test aparatı gösterilmiştir.



Şekil 6.10. Yassı ve uzun daneleri ölçme test aparatı [189,196,218].

6.2.5. Agreganın Kırılma Yüzdesi Tayini

Dere malzemesinden kırılarak elde edilen agreganın kırılmış yüzlerinin, ağırlıkça kırılma yüzdesini tayin etmek için uygulanmaktadır.

Dere malzemesinin kırılmasıyla elde edilen agreganın BSK’da kullanılabilmesi için en az iki yüzünün kırılması gerekir. Kırılmış daneler arasındaki içsel sürtünme yüksek olduğundan danelerin birbirine kenetlenmesi daha fazla dolayısıyla agregalarda yük taşıma kapasitesi daha fazladır [173].

ASTM D5821 standardına göre gözle incelenerek belirlenen kaba agreganın köşelliliği, 4.75mm’den daha büyük agregaların bir ya da daha fazla kırılmış yüzünün agreganın ağırlığına göre yüzdesi olarak tarif edilmektedir [189,196,208].

AASHTO T304 standardına göre 2.36 mm’lik elekten geçen ince agreganın gevşekçe sıkıştırılmış haldeki sahip olduğu boşluk yüzdesi, bu özelliğin kriteri olarak belirlenmiştir.

Kaba ve ince agreganın kırılma kriterleri Tablo 6.5’te karşılaştırılmıştır.

Tablo 6.5. Kaba ve ince agreganın kırılma kriterleri [189,196,218].

Trafik (ETDY), milyon	Yüzeyden Derinlik (Kaba agreganın kriterleri)		Yüzeyden Derinlik (İnce agreganın kriterleri)	
	<100 mm	>100 mm	<100 mm	>100 mm
<0,3	55/-	-/-	-	-
<1	65/-	-/-	40	-
<3	75/-	50/-	40	40
<10	85/80	60/-	45	40
<30	95/90	80/75	45	40
<100	100/100	95/90	45	45
≥100	100/100	100/100	45	45

6.2.6. Hava Tesirlerine Karşı Dayanıklılık Deneyi

Bu deney metodu agregaların doymuş sodyum sülfat çözeltileri ile ufalanmaya karşı dayanıklılığının tayin edilmesini kapsar.

AASHTO T104 veya ASTM C88 standardına göre doymuş sodyum sülfat (Na_2SO_4) çözeltisine daldırılan agreganın kütleğinde oluşan kayıp malzemenin yüzdesi olarak belirlenir ve agregaların servis süresince hava etkileriyle donarak ufalanmaya karşı olan direncini ifade eder [164,170,189,196,218].

Tablo 6.6'da hava tesirlerine karşı dayanıklılık deneyinde kullanılan malzemelerin dane boyutları ve miktarları verilmiştir.

Tablo 6.6. Sağlamlık deneyinde uygulanan miktar [219].

Dane Boyu (mm)		Ağırlık (gram)	
9.5-4.75		300	
19-9.5	12.5-9.5	330	1000
	19-12.5	670	

Belirtilen miktarda tartılan numune özel tel sepetler içine konarak, üstü en az 2 cm kaplanacak şekilde çözelti içine daldırılır. Üzeri kapatılarak oda sıcaklığında 16 saatten az, 18 saatten fazla olmamak üzere bekletilir. Daldırma işlemi sonunda numune çözeltiden çıkarılarak 15 dakika süzölmeye bırakılır ve 100°C etüvde sabit ağırlığa kadar kurutulup oda sıcaklığında soğutulur. Bu daldırma-kurutma işlemi 5 kez tekrarlanır. Daha sonra numune iyice yıkanıp 110°C etüvde değişmez ağırlığa kadar kurutulur ve eleme yapılarak elek üzerindeki malzeme tartılır [164].

Agregalarda donma kaybı yüzdesinin en fazla alt temel tabakasında %20, temel tabakasında %15, binder tabakasında %12, aşınma tabakasında ise %10 olması istenmektedir [189,196].

6.3. Bitümlü Karışımlara Uygulanan Deneyler

BSK'ların kullanılabilirliğini test etmek için bir takım dayanım ve performans deneyleri uygulanmaktadır. Bu deneyler; Marshall metoduna göre dizayn işlemleri ve dayanım

özelliklerini belirlemek için Marshall stabilitesi ve akma deneyleri, performans özelliklerini tespit etmek için ise indirekt çekme dayanımı, indirekt çekme rijitlik modülü, indirekt çekme tekrarlı yorulma, dinamik sünme deneyleri ve bitüm miktarını test etmek için santrifuj deneylerinden oluşmaktadır. Deneysel çalışma kapsamında laboratuvar ortamında hazırlanan dizayn numuneleri ve uygulama yolundan temin edilen karot numunelerine dinamik sünme deneyi dışındaki dizayn, dayanım ve performans deneyleri uygulanmıştır.

6.3.1. Marshall Metodu ile Karışım Dizaynı

Kaplama karışımlarının dizaynında Marshall Metodu kavramı, bitüm mühendisi Bruce Marshall tarafından formüle edilmiştir. U.S. Corps of Engineers geniş araştırma ve çalışmalarıyla karışım dizayn kriterlerini geliştirmiştir. Marshall test metodu "American Society for Testing and Materials" tarafından standartlaştırılmıştır.

Marshall yöntemi, yalnızca max. boyu 25mm. veya daha küçük agrega ihtiva eden ve penetrasyon veya viskozite ile sınıflandırılmış asfalt çimentosu kullanılan sıcak karışım asfalt karışımlarına uygulanır. Bu metotta Marshall aleti kullanılarak bitümlü karışımın plastik akmaya karşı direnci verilmektedir [204].

Marshall metodunda deney numunelerinin hazırlanmasından önce aşağıdaki işlemlerin yapılmış olması gerekmektedir.

- a) Karışımında kullanılacak malzemelerin şartnamede istenilen özelliklere uygunluğunun kontrolü
- b) Agrega karışım gradasyonunun şartname gradasyonuna uygunluğunun kontrolü
- c) Yoğunluk ve boşluk analizinde kullanmak için, karışımında kullanılan agreganın hacim özgül ağırlığı ve asfalt çimentosunun özgül ağırlığının tayini

Bu işlemler rutin testlerin, şartnamelerin ve laboratuvar tekniğinin gereklilikleri olup, birçok karışım dizaynında yapılması gereken işlerdir [174].

Çalışmada, BSK Marshall numunelerine uygulanan stabilite ve akma deneyi TS EN 12697-34 standardına göre yapılmıştır [218].

BSK'da kullanılacak agregalar, şartnamenin öngördüğü özellikleri sağlayacak şekilde granülometrik oranlarda belli ağırlıklarda alınarak 40/60, 50/70 penetrasyonlu bitüm ile hazırlanan karışımlarda 150-165°C'de, 70/100 penetrasyonlu bitüm ile hazırlanan karışımlarda 145-160°C'de hazırlanmış etüvde yaklaşık 3 saat ısıtılır. Agrega harmanına

kariştırılacak olan bağlayıcı malzeme, şartnamelerin öngördüğü özellikleri sağlayacak şekilde belli oranlarda alınarak 40/60, 50/70 penetrasyonlu bitüm kullanılması durumunda 145-160°C, 70/100 penetrasyonlu bitüm kullanılarak hazırlanan karişımlarda ise 140-155°C'lik etüvde 30 dakika bekletilir [166,248].

şekil 6.11, agrega ve bitümlerin ısıtılmasında kullanılan etüvlerdir.



şekil 6.11. Agrega ve bitümlerin ısıtıldığı etüvler

Etüvde ısıtılan agrega ve bitüm malzemeleri, şekil 6.12'de gösterilen hassas terazide 1200gr. Marshall briketi ağırlılığını oluşturacak şekilde tartılır ve mikserde kariştırılarak numune kalıplarına yerleştirilir.



şekil 6.12. BSK numune hazırlanması ve silindir kalıba yerleştirilmesi

BSK numune kalıplarına yerleştirilen karişım malzemeleri silindir Marshall briketi oluşturmak için sıkıştırma cihazında sıkıştırılır. Standartta göre öncelikle sıkıştırılmış ve soğumuş numunelerin yükseklikleri ölçölerek kaydedilmektedir.

şekil 6.13'te BSK karişımların hazırlandığı mikser, Marshall sıkıştırma tokmağında

sıkıştırılmaları ve numunelerin hidrolik krikoyla kalıplardan çıkarılması görülmektedir.



Şekil 6.13. BSK numunelerin karıştırılması, sıkıştırılması ve kalıptan çıkarılması

Bitüm ağırlıkları agrega karışımına ilk aşamada optimum bitüm oranını tespit etmek için değişik oranlarda katılmakta daha sonra ise optimum bitüm oranlarında hazırlanan karışım numuneleri performans deneylerinde kullanılmak üzere hazırlanmaktadır.

Değişik bitüm oranlarındaki Marshall numuneleri, kalıp içinde ve dışında olmak üzere Şekil 6.14'te gösterilmiştir.



Şekil 6.14. Değişik bitüm oranlarındaki deney numuneleri

Dere malzemesi ve asfalt çimentosu ile hazırlanmış Marshall briketleri sıcaklığı $60\pm1^{\circ}\text{C}$ olan su banyosuna yerleştirilerek 40-60 dakika bekletilmiştir. Kırma çenesi ise $60\pm1^{\circ}\text{C}$ sıcaklıktaki suda 30 dakika veya $60\pm1^{\circ}\text{C}$ sıcaklıktaki etüvde 1 saat bekletilmelidir (Şekil 6.15). Numunenin sudan çıkmasından itibaren 40 saniye içerisinde deney bitirilmelidir.



Şekil 6.15. Marshall numuneleri ve kürü

Su banyosundan çıkartılan numuneler, Marshall yükleme aygıtının aparatlarından olan kırma kafasına yerleştirilmektedir. Kırma kafasının alt ve üst parçaları numune yerleştirilmeden önce temizlenip yağlanmış olması gerekmektedir. Akma ve stabilite değerlerini ölçen elektronik Marshall test aletine, numune kırma kafası içinde düzgünce oturtulup, flowmetre (kılavuz çubuğu) ile teması sağlanmalıdır. Yüklemeye 51 mm/dk.lık sabit bir deformasyon hızıyla devam edilmektedir. En büyük yük ve buna karşılık gelen akma değerine ulaşıldığında alet otomatik olarak yüklemeyi bitirmektedir. En büyük akma ve buna karşılık gelen yük, aletin ekranından okunup kaydedilmiştir.

Şekil 6.16’da Marshall test cihazı ile numunelerin akma ve stabilite ölçümleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 6.16. Marshall stabilite ve akma ölçüm cihazı

KTŞ’de 63,5 mm. yüksekliğindeki Marshall numuneleri için bulunan stabilite değerleri

gerçek değerlerdir. Bu kalınlıktan farklı olan numunelerde Marshall stabilite düzeltme faktörleri katsayıları kullanılarak düzeltilmiş stabilite değerleri bulunup işlemler yapılmaktadır [221].

Farklı yüksekliklere sahip numuneler için stabilite düzeltme katsayıları Formül 6.3'teki bağıntı yardımıyla tespit edilmektedir.

$$c = 5,24 \times e^{(-0,0258 \times h)} \quad (6.3)$$

Burada c , düzeltme katsayısı, h ise mm. olarak numune yüksekliğidir. Elde edilen stabilite ve akma değerlerinin ortalaması alınarak, stabilite ve akma değerleri belirlenmektedir.

Marshall yükleme aletinde, stabilite ‘‘kN’’ ve akma ‘‘mm’’ olarak okunmakta, stabilite değeri daha sonra düzeltme faktörüyle çarpılıp, ‘‘kgf’’ cinsine çevirilerek gerçek stabilite değeri bulunmaktadır.

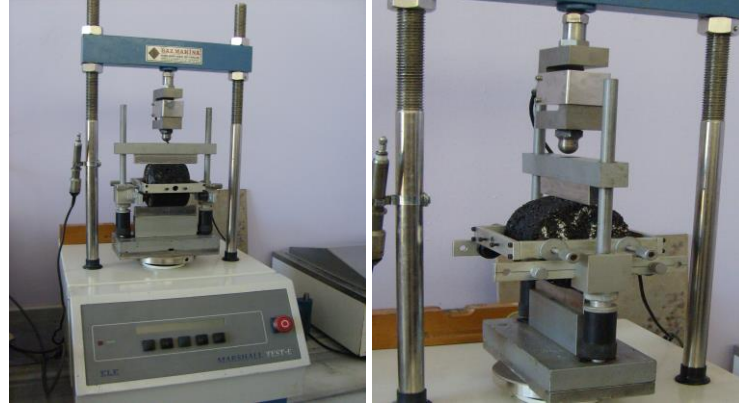
Deney yoluyla elde edilen stabilite ve akma değerlerinde; stabilite ortalamasından %15 farklı stabilite değerine sahip olan numuneler ve akma ortalamasından %20 farklı akma değerine sahip numuneler değerlendirmeden çıkarılmaktadır. Geri kalan numunelerin ortalaması alınarak numunelerin stabilite ve akma değerlerinin ortalamadan sapma miktarları belirlenmektedir. Numunelerde aynı oranda sapma olduğu takdirde numune serisi iptal edilmekte ve yeni bir seri numune üzerinde deney tekrarlanmaktadır.

Marshall oranı, karışımın sertliğinin ve asfalt betonunun deformasyona karşı direncinin bir göstergesidir Marshall stabilitesi değerinin akma değerine bölünmesi ile Marshall oranı (MQ) belirlenmektedir [63,73,219,223].

6.3.1.1. İndirekt Çekme Dayanımı Deneyi (ITS)

İndirekt çekme deney metodunda Marshall briketi numuneleri, 25°C'deki suda 2 saat bekletilerek ve daha sonra Marshall testi cihazında 50±2 mm/dk. hızla çapsal düzlemde yükleme yapılarak kırılmaktadır.

Şekil 6.17'de çekme dayanım düzeneği ve aparatları gösterilmiştir.



Şekil 6.17. Çekme dayanımı deney düzeneği

Deneyden elde edilen maksimum yük değerleri kullanılarak çekme dayanımı değerleri aşağıdaki Formül 6.4 ve Formül 6.5 yardımıyla belirlenmiştir. Formülde TS çekme dayanımını (kPa), P_{mak} kırılmaya neden olan maksimum yükü (kN), t ortalama numune yüksekliğini (m), d numune çapını (m) ifade etmektedir. Çekme dayanımı oranı (TSR) ise koşullandırılmış numunelerin çekme dayanımı değerlerinin ($ITS_{yaş}$) koşullandırılmamış numunelerin çekme dayanımı değerlerine (ITS_{kuru}) oranlanması ile belirlenmektedir. Superpave şartnamesine göre bu değer minimum %80 olması istenmektedir.

$$ITS = \left(\frac{2P_{mak}}{\pi dt} \right) \quad (6.4)$$

$$TSR = \left(\frac{ITS_{yaş}}{ITS_{kuru}} \right) * 100 \quad (6.5)$$

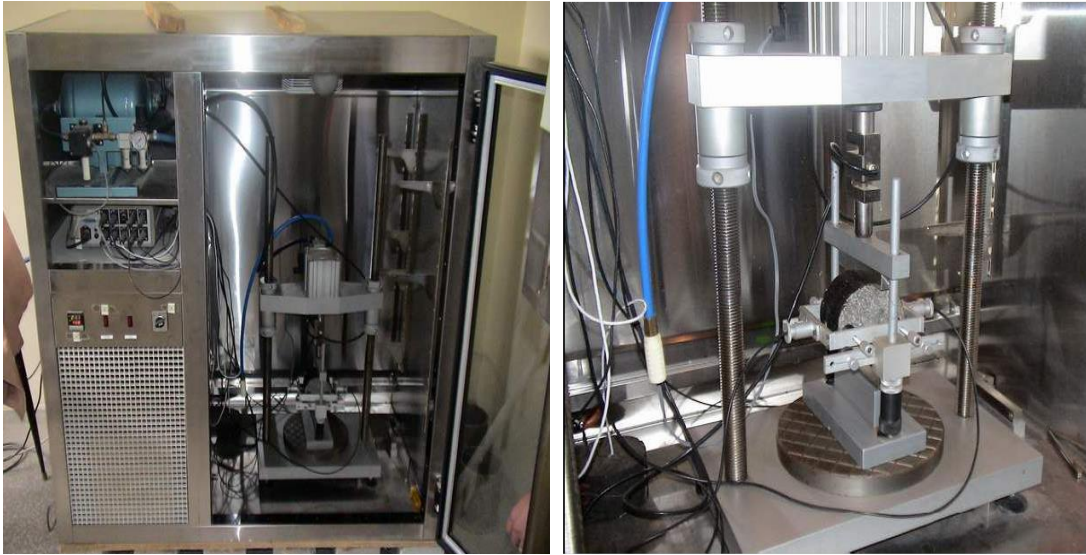
6.3.1.2. İndirekt Çekme Rijitlik Modülü Deneyi (ITSM)

Bitümlü tabakaların yük dağıtma kabiliyetinin bir ölçüsü olan rijitlik modülü, BSK'ların en önemli performans karakteristiklerinden biridir. 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

içermekte olup, rijitlik modülü hesaplarında yük, deformasyon ve numune kalınlık parametreleri kullanılarak hesaplamalar yapılmaktadır [224].

Deney sistemi; iklimlendirme kabini, yükleme çerçevesi, yazılım ve bilgisayardan oluşmaktadır. Standart deney sıcaklığı 20°C olmasına rağmen iklimlendirme kabini sayesinde deney farklı sıcaklıklarda da uygulanabilmektedir. Deney öncesinde numunelerle ilgili numune yüksekliği, çapı, tahmini poisson oranı, hedef yatay deformasyon, yük etki süresi ve yük artış süreleri, tahmini rijitlik modülü gibi değerler önceden yazılıma girilmekte ve numune en az 3 saat deney sıcaklığında bekletilmektedir. Daha sonra numune yükleme çerçevesine yerleştirilerek yatay deformasyonu ölçen sensörler ayarlanmaktadır. Deneyde, numunelere öncelikle ön yükleme işlemi uygulanmaktadır. Ön yüklemenin 5 defa tekrarlanması sırasında deney aleti, otomatik olarak numunede yatay ekseninde hedef deformasyonu meydana getirecek yükü tespit etmektedir. Numuneye ön yükleme ile belirlenen yükte uygulanan 5 darbe sonucu aşağıdaki bağıntı kullanılarak ITSM değerleri belirlenmektedir.

ITSM deneyi ile ilgili Şekil 6.18’de deney düzeneği kullanılmıştır.



Şekil 6.18. İndirek çekme rijitlik modülü (ITSM) deney cihazı ve düzeneği

Bu deney BS DD 213 standardı ile tanımlanmış hasarsız bir deney olup, rijitlik modülü (S_m , MPa) Formül 6.6 ile hesaplanmaktadır.

$$S_m = F(R + 0,27) / LH \quad (6.6)$$

Formül 6.6'da; F , maksimum dikey yükü (N); H , 5 yük tekrarı sonucunda oluşan ortalama yatay deformasyonu (mm); L , ortalama numune kalınlığını (mm); R ise 0.35 olup, poisson oranını ifade etmektedir [213,225].

6.3.1.3. İndirekt Çekme Tekrarlı Yorulma Deneyi

Yorulma çatlakları, BSK'larda en fazla görülen ve yükten kaynaklanan bozulma türüdür. Yorulma çatlakları, tekrar eden yükler sonucu çatlak oluşumunu takiben kademeli olarak artmaktadır [226].

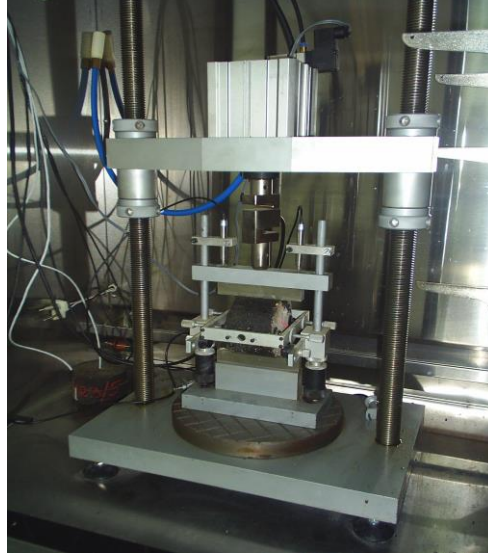
İnce kaplama veya zayıf alt tabakalı yol üst yapılarında, ağır trafik yükleri altında aşırı defleksiyonlar oluşur ve kaplama altında yanal çekme gerilmelerini artırarak yorulma çatlaklarına neden olmaktadır.

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 [213].

Üst yapı performansında en önemli özellik olarak BSK'ların yorulma davranışı kabul edilmektedir. BSK'ların sıkışması, asfalt içeriği ve hava boşluğu gibi özelliklerin etkinlik dereceleri diğer deneylere göre, yorulma davranışının incelenmesi ile daha açık bir şekilde belirlenebilmektedir. Kaliforniya Ulaştırma Bölümünde yapılan bir çalışmada, %5 asfalt ve hava boşluğunda imal edilmiş BSK'larda, asfalt içeriğinin hedeflenen değerden %1 az olmasının yorulma ömrünü %12, hava boşluğunun %1 artması ise yorulma ömrünü %30 azalttığı belirtilmiştir [227].

UMATTA deney aleti kullanılarak gerilme kontrollü indirekt çekme yorulma deneyi (İÇYD), yapılmaktadır. Deney sistemi olarak ITSM deneyinde kullanılan iklimlendirme kabini, yükleme çerçevesi, yazılım ve bilgisayardan oluşan ekipman kullanılmaktadır. Standart deney sıcaklığı 25°C olmasına rağmen iklimlendirme kabini sayesinde farklı sıcaklıklarda da deney yapılabilir. Deneye başlamadan önce numuneler, en az 3 saat deney sıcaklığında deney aleti içinde bekletilmektedir. Numune yüksekliği, çapı, uygulanacak gerilme yük periyodu ve yük artış süreleri gibi değerler önceden yazılıma girilmektedir. Numune, yükleme çerçevesine yerleştirilmekte, düşey deformasyonu okuyacak doğrusal değişken türevsel dönüştürücüler (LVDT) ayarlanmakta ve deneye başlanmaktadır. Deney, numuneler tam olarak kırılıncaya kadar devam etmektedir.

Şekil 6.19' da deney düzeneği görülmektedir [225].



Şekil 6.19. İndirekt çekme tekrarlı yorulma deney düzeneği

Yorulma karakteristikleri genel olarak başlangıç gerilmesi ya da birim şekil değiştirmesi ile bozulmaya neden olan yükleme adedi arasındaki ilişki olarak açıklanabilir. BSK'ların yorulma karakteristikleri genellikle gerilme ya da şekil değiştirme kontrollü olmak üzere, tekrarlı eğilme kırılganlığı, direk çekme ve diametral deneylerle belirlenmektedir. Bu deneylerde değişik geometrilere sahip numunelere sinüsoidal ve haversine gibi farklı kontrollü yükleme çeşitleri uygulanabilmektedir.

İÇYD'de BSK'ların yorulma davranışı, logaritmik eksenlerde gerilme yada şekil değiştirmenin bozulmaya neden olan yük tekrür sayısı arasındaki eğim olarak karakterize edilebilmektedir. Bu ilişki Formül 6.7'deki gibi tanımlanmaktadır.

$$N_f = a \left(\frac{1}{\epsilon_o} \right)^b \cdot \left(\frac{1}{S_o} \right)^c \quad (6.7)$$

Formül 6.7'de; N_f , yorulma ömrü (yük tekrar sayısı), ϵ_o , başlangıç şekil değiştirmesi, S_o karışımın başlangıç rijitliği, a,b,c, deneysel olarak belirlenen katsayılarıdır.

Farklı gerilmelerde kırılmaya neden olan yük tekrür sayısı N_f ile gerilme (σ) arasındaki klasik yorulma ilişkisi, logaritmik ölçekte çizilen grafikten veya Formül 6.8'deki Wöhler formülünden yararlanılarak da belirlenmektedir.

$$N_f = k_1 * \left(\frac{1}{\sigma}\right)^{k_2} \quad (6.8)$$

Formül 6.8’de; N_f , yorulma ömrünü ifade eden yük tekerrür sayısını, k_1 ve k_2 malzeme karakteristiklerini, σ uygulanan gerilmeyi (kPa) ifade etmektedir [251].

Yorulma denklemlerinden elde edilen k_1 ve k_2 katsayıları, karışımların yorulma karakteristikleri üzerinde katkı maddelerinin etkilerinin belirlenmesinde kullanılabilmektedir [228].

Deneyler deformasyon kontrollü olarak uygulanabildiği gibi gerilme kontrollü olarak yapılabilmektedir. Gerilme kontrollü deneyde gerilme sabit kalmakta şekil değiştirme yük tekrarı ile artmaktadır. Şekil değiştirme kontrollü deneyde ise 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.

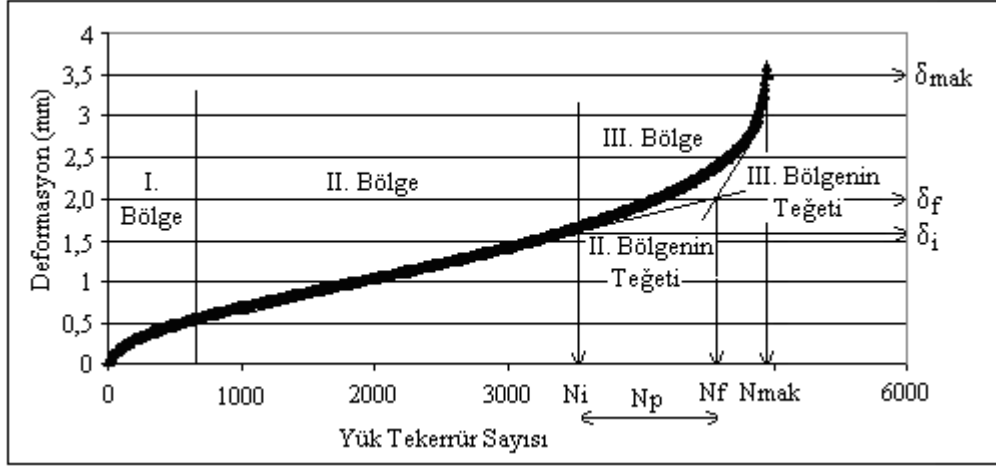
Francken’e göre yük ve deformasyon kontrollü yorulma deneyleri arasındaki farklar Tablo 6.7’de verilmiştir [229].

Tablo 6.7. Yük ve deformasyon kontrollü yorulma deneylerinin karşılaştırılması [231].

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

Şekil 6.20’deki grafikte; gerilme kontrollü olarak yapılan yorulma deneyine göre yük tekerrür sayısı ile oluşan deformasyon miktarı gösterilmiştir. Yorulma ömrü, bazı araştırmacılar tarafından deformasyon-yük tekerrür sayısı grafiğinde eğimin önemli oranda

değiştirdiği nokta veya II. kısım ve III. kısımlara çizilen teğetlerin kesim noktası olarak tanımlanmaktadır [230,231].



Şekil 6.20. Temsili deformasyon - yük tekrür sayısı ilişkisi

Şekil 6.20'deki grafikte I. , II. ve III. bölgedeki deformasyonların değişimlerindeki artışlar gösterilmiş olup, çatlak oluşumu III. Bölgede başlamıştır [232].

Formül 6.9'da gösterilen çatlak ilerleme oranı (r_p), çatlak oluşuktan itibaren yorulma ömrünün sonuna kadar her 1mm deformasyon oluşabilmesi için gerekli yük tekrar sayısının deformasyon miktarına oranını ifade etmektedir [230].

$$r_p = \frac{N_p}{\delta_f - \delta_i} \quad (6.9)$$

Burada; r_p çatlak ilerleme oranı, N_p çatlak ilerlemesi için gerekli yük tekrar sayısı, δ_f bozulma anında toplam deformasyon, δ_i çatlak başladığı andaki toplam deformasyonunu ifade etmektedir.

Çatlak ilerleme oranı, çatlak ilerleme hızıyla ters orantılıdır. Çatlak ilerleme oranının büyük olması, çatlak ilerleyişinin daha yavaş olduğunu göstermektedir [227].

6.3.1.4. Dinamik Sünme Deneyi

BSK'ların kalıcı deformasyon oluşumuna karşı dayanımını belirlemek amacıyla en sık kullanılan deneylerden biri tekrarlı sünme deneyidir [233].

Yol üst yapısı servis ömrü boyunca tekrarlı trafik yüklerine maruz kalmakta, tekerlek izleri tabakalarda kademeli olarak artarak kalıcı deformasyonlar meydana gelmektedir [50]. Deformasyonlar en fazla trafiğe doğrudan maruz kalan kaplama tabakasında görülmekte, zamanla meydana gelen deformasyonlar ilk olarak sıkışmalardan dolayı konsolidasyon oturması şeklinde daha sonra kalıcı kayma deformasyonları şeklinde görülmektedir [234].

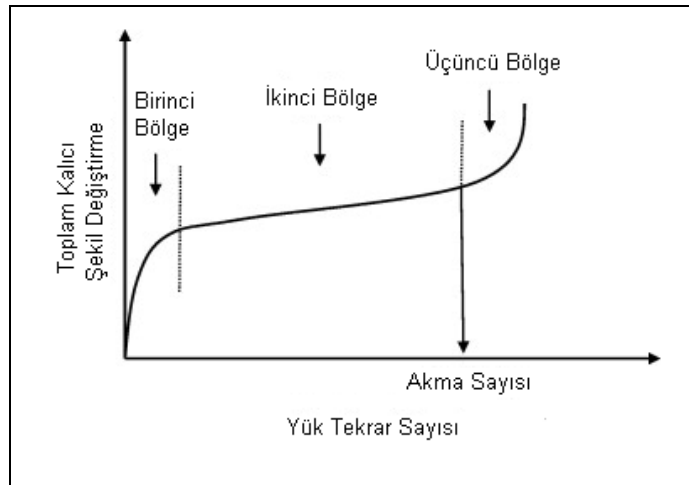
Tekrarlı sünme deneyi, UMATTA deney cihazı kullanılarak yapılmaktadır. UMATTA deney sistemi; iklimlendirme kabini, yükleme çerçevesi, yazılım ve bilgisayardan oluşmaktadır. Standart deney sıcaklığı 40°C olmasına rağmen iklimlendirme kabini sayesinde deney farklı sıcaklıklarda ve yüklemelerde yapılabilir. Deney öncesinde standart deney sıcaklığının numune bünyesine tam olarak nüfus etmesini sağlamak için numuneler en az 4 saat deney sıcaklığında bekletilmektedir. Numune yüksekliği, çapı, uygulanacak gerilme, ön yükleme süresi, ön yükleme gerilmesi, yük periyodu ve yük artış süreleri gibi değerler önceden yazılıma girilmektedir. Ortam sıcaklığına ulaşan ve deneysel çalışmaya hazır hale gelen silindirik numuneler daha sonra yatay konumda yükleme çerçevesine yerleştirilerek, yüzeyine dairesel metal plak temas edecek şekilde bırakılmakta, üzerine dik konumda yerleştirilen sabit değerdeki yük ve düşey deformasyonu okuyacak LVDT'ler ayarlanarak deneye başlanmaktadır. Düşey yük silindir numunenin yatay yüzeyine belirli periyotlarla tekrarlı olarak uygulanmaktadır. Numune üzerine dik olarak yerleştirilen LVDT'ler yardımıyla her bir yük tekrarı sonucu oluşan plastik ve elastik deformasyonlar belirlenebilmektedir.

Şekil 6.21'de UTM cihazı tekrarlı sünme deneyi testi düzeneği gösterilmiştir.



Şekil 6.21. Dinamik sünme deney düzeneği

Numunede bozulma meydana gelinceye kadar devam eden deney sonucunda Şekil 6.22’de görüldüğü gibi yük tekrar sayısına bağlı olarak deformasyonlar meydana gelmektedir. Birinci bölgede, numunenin sahip olduğu boşluklardan dolayı konsolidasyon meydana gelerek bu bölgede karışımın hacmi azalmakta ve şekil değiştirme başlangıçta önemli oranda artmakta daha sonra azalmaktadır. İkinci bölgede uygulanan tekrarlı yük sonucu toplam şekil değiştirmede lineere yakın bir değişim gözlenmektedir. Üçüncü bölgenin başladığı yük tekrar sayısı “akma sayısı” olarak isimlendirilmektedir. Üçüncü bölge ise ikinci tür kalıcı deformasyonun olduğu bölge olup, bu bölgede kayma deformasyonları oluşmakta ve şekil değiştirme miktarı tekrar yükselişe geçmektedir [225,235,236].



Şekil 6.22. Yük tekrar sayısı - şekil değiştirme ilişkisi

Dinamik sünme deneyinde yük tekrar sayısının bir fonksiyonu olarak ölçülen toplam kalıcı deformasyon, tekerlek izi potansiyeli ile ilişkilendirilebilmektedir. Yapılan çalışmada beş deney arasından dinamik sünme deneyinin arazide ölçülen tekerlek izi derinliği ile çok iyi korelasyon verdiği belirtilmiştir [237].

Dinamik sünme deneyinde toplam eksenel birim şekil değiştirme, sünme ve rezilyans modülü rijitliği aşağıdaki Formül (6.10 - 6.14) yardımıyla hesaplanmaktadır [238].

$$\varepsilon_c = (L3_n - L1) / G \quad (6.10)$$

$$\varepsilon_r = (L2_n - L3_n) / (G - (L3_n - L1)) \quad (6.11)$$

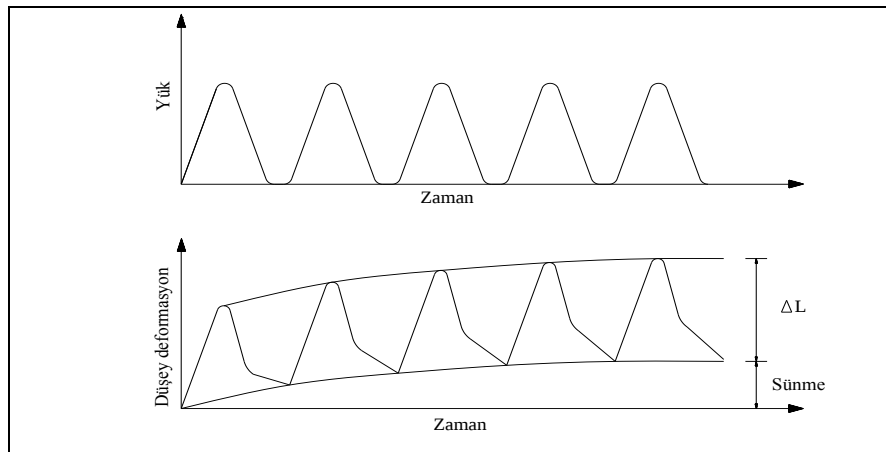
$$\sigma = F / A \quad (6.12)$$

$$E_c = \sigma / \varepsilon_c \quad (6.13)$$

$$E_r = \sigma / \varepsilon_r \quad (6.14)$$

Burada; ε_c , toplam plastik (kalıcı) eksenel birim şekil değiştirme, ε_r , toplam elastik eksenel birim şekil değiştirme, E_c , sünme modülü (sertliği), E_r , rezilyans modülü (sertliği), G , numunenin başlangıç yüksekliği (mm), $L1$, LVDT'nin başlangıç referans deplasmanı (mm), $L2_n$, n darbe sayısındaki maksimum deplasman (mm) (elastik + plastik), $L3_n$, $(n+1)$. darbe uygulanmadan önceki deplasman (mm) (plastik), σ , maksimum düşey gerilme (kPa), F , maksimum düşey yük (N), A , numunenin kesit alanıdır (cm^2). Formül 6.13 ve Formül 6.14'te görüldüğü üzere plastik ve elastik birim şekil değiştirme ile sünme ve rezilyans modülü değerleri ters orantılıdır [225,238].

Şekil 6.23'te zamana bağlı yük ve düşey deformasyon değişimleri görülmektedir.



Şekil 6.23. Yük - zaman ve deformasyon - zaman ilişkisi

6.4. Arazi Deneyi Uygulama Yöntemleri

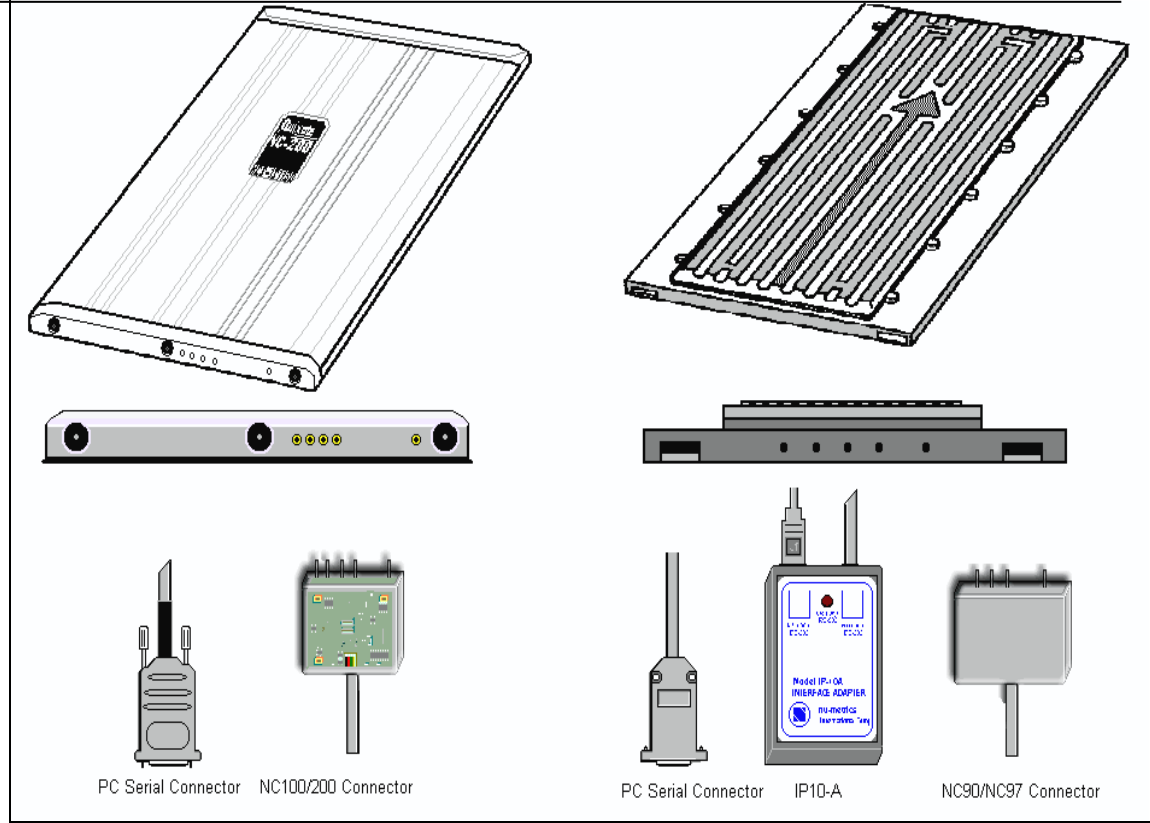
Çalışma kapsamında, arazi deneylerinden ilk olarak taşıt tipi, trafik hacmi ve yol yüzey sıcaklık değerini gösteren trafik ölçüm cihazı kullanılmıştır. Kaplama yoğunluğu ve sıkıştırma kontrolünün laboratuvar ortamında test edilmesi için yol yüzeyinden karot temin edilmiştir. Ayrıca yol yüzeyinin kumpasla tekerlek izi derinliğinin ölçümü, yoğunluk performansının belirlemek için nükleer yoğunluk cihazıyla ölçüm ve yüzey sertliğini tespit etmek için Schmidth test çekici ile arazi deneyi uygulama yöntemleri gerçekleştirilmiştir. Karot numunelerinin alımı ve arazi test ölçümleri bir yıllık zaman diliminde 3 aylık periyotlarla gerçekleştirilmiştir.

6.4.1. Trafik Ölçümünde Kullanılan NC 100-200 Trafik Analiz Cihazının Özellikleri

QTT (NC 200) trafik analiz cihazı ilave sensör gerektirmeyen araç detektörleridir. Koruyucu kapak altında yolun merkezine konulur ve araçlar üzerinden geçer. Fiziksel bir temas gerektirmez. QTT trafik analiz cihazı, araçların dünyanın manyetik alanına doğru hareket etmeleri prensibiyle çalışır ve araçları saptamak için VMI (vehicle magnetic imaging) kullanır. Başka bir ifadeyle, bir araç trafik analiz cihazı üzerinden geçtiği zaman, yapısındaki demir parçalar dünyanın manyetik alanıyla etkileşir. Bu etkileşim, trafik analiz cihazındaki sensörlerde elektriksel sinyal değişiklikleri meydana getirir.

Sonuçta, QTT trafik analiz cihazı, araç mevcudiyetini belirler, araçları sayar, araç hızını ölçer ve araç uzunluğunu kaydeder. Yolun yüzey sıcaklığını da raporlar.

Şekil 6.24'te trafik ölçüm cihazı ve aparatları gösterilmiştir.



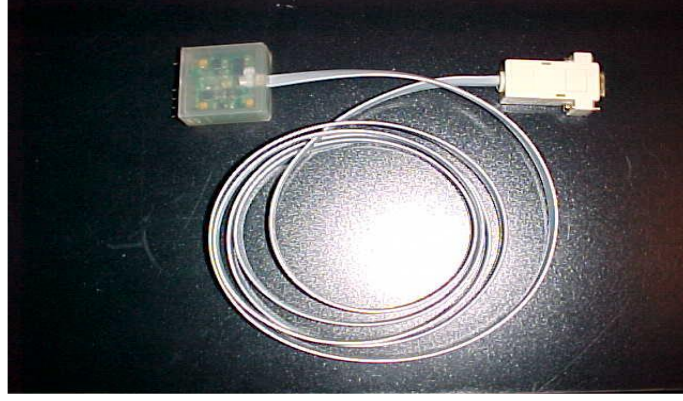
Şekil 6.24. QTT trafik analiz cihazı ve bağlantı elemanları

6.4.1.1. QTT Trafik Analiz Cihazı ile Haberleşme

Bilgisayar ve cihaz arasındaki haberleşmeyi sağlamak için HDM yazılımı ve interface adaptör kablosu gereklidir. Bu kablo ile cihaz programlanır ve cihazdan bilgiler alınabilir. Interface kablonun bir ucu bilgisayarın seri portuna diğer ucu cihazın üzerindeki pin soketlere takılır. Eğer bilgisayar üzerinde seri port yoksa, USB portu için bir adaptör kullanılmalıdır.

Interface kablo üzerinde birer adet yeşil ve kırmızı led görünür. Cihazdan bilgisayara veri aktarırken yeşil led, bilgisayardan cihaza bilgi aktarırken kırmızı led yanar.

Cihaza ait veri aktarım aparatı Şekil 6.25'teki gibidir.



Şekil 6.25. QTT NC-100/200 ara yüz iletişim bağlantı kabloları

6.4.1.2. QTT Trafik Analiz Cihazının Kurulumu ve Alınması Gereken Tedbirler

QTT trafik analiz cihazı trafikte yolun merkezine konulmalıdır. Cihaz üzerindeki ok, trafik akış yönünü işaret etmelidir. Eğer ters yöne monte edilirse araçları sayar fakat diğer bilgiler elde edilemez.

Cihazı virajlara veya geniş yollara monte etmemeye özen gösterilmelidir. (Araçlar cihazı kaçırabilir) Metal köprülere konulmamalıdır. Eğer köprü bilgileri ölçülmek isteniyorsa köprüden önce veya sonra monte edilmelidir. Her zaman cihaz en iyi ve doğru sonuçlar için, araçların serbest olarak geçtiği bir bölgeye monte edilir. Cihazı sabitlemek için plastik koruyucu kapak vidalanır (minimum 10 cm uzunluktaki 8 adet vida ile). Çakıllı ve gelişmemiş yollarda da 8 adet vida kullanılmalıdır.

QTT trafik analiz cihazını kurarken ya da sökerken, uygun kıyafet giymeye; reflektif yelek, koruyucu gözlük, sert şapka vb. dikkat edilmelidir. Trafik alanına trafik durmadan veya yönü trafik kontrol personeli tarafından güvenli bir şekilde değiştirilmeden asla girilmemelidir.

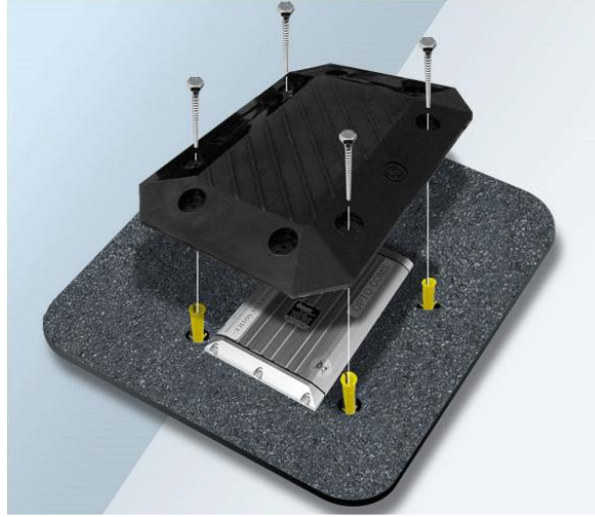
Montaj işlemleriyle ilgili olarak montaj donanımları (dübel, dişli duvar vidası, duvar matkabı, somun) tedarik edilmelidir. Vidalama delme işlemleri için hilti matkap kullanılabilir.

Anılan cihaz; montaj, söküm, şarj ve yükleme gibi sırasıyla birbirini izleyen adımların uygulanmasıyla kullanılmaktadır:

1) Yerleştirme: Trafik akışıyla aynı yönde ve mümkün olduğu kadar yakın bir şekilde yolun merkezine cihaz yerleştirilir. Pürüzsüz ve düzgün bir alan seçilir. Kapak ve cihazı alt yüzü yol yüzeyine gömülü olacak şekilde kapak cihazın üzerine yerleştirilir. Kapak

üzerindeki ok ile cihaz üzerindeki okun aynı yönü gösterdiğine trafik akışı ile aynı yönde olduğundan emin olunmalıdır.

Şekil 6.26’da trafik ölçüm cihazının yol yüzeyine kurulumu gösterilmiştir.



Şekil 6.26. Trafik ölçüm cihazı kurulumu

2) Vidalama: Hiçbir zaman cihaz çivi ile monte edilmemelidir. 4 adet dübel ve vida ile montajlanır. Yoğun trafik akışı olan veya yumuşak zeminli yerlere 8 adet vida ile monte edilmelidir. Tavsiye edilen ölçülerdeki vidalar kullanılmalıdır. Delikler açılır (Vida uzunluğundan minimum ½ " daha derine), vidalar deliklere yerleştirilir ve hilti matkapla vidalar sıkıştırılır. Kapak trafik akışının dışında gözükmürse sökülüp yeniden monte edilmelidir. Eğer hizalama doğru sağlanamazsa, çalışma sonuçları sağlıklı çıkmayacağından yeni bir çalışma yapmak zorunda kalınır.

3) Sökme: Matkapla vidalar sökülerek cihaz yerden alınır.

4) Kapak bir sonraki çalışma için tekrar kullanılır. Vidalar kullanılamaz.

5) Yükleme işlemi : Cihaz geri alınarak yükleme işlemine başlanır.

6.4.1.3. Yükleme Verileri - QTT Trafik Analiz Cihazının Okunması

Çalışma bittikten sonra cihaz yoldan alınır. Cihazın elektriksel bağlantı pinlerinin temiz ve kuru olmasına dikkat edilir. Daha sonra bilgiler interface kablo ve HDM 9.0 yazılımı vasıtasıyla cihazdan bilgisayara aktarılır. Eğer batarya okuma için çok düşük değerdeyse,

okuma işleminden önce batarya yeniden şarj edilir. Analiz sonuçları incelenir ve istenilen grafik ve raporlamalar alınır.

6.4.1.4. Mobil Trafik Analiz Cihazı Teknik Özellikleri

Mobil trafik analiz cihazı uzun ömürlü ve kolay kullanımı olduğundan yıllarca bakım maliyeti gerektirmeden kullanılabilir.

Şekil 6.27’de gösterilen cihaz 12 saatlik bir dolum süresinden sonra 21 gün boyunca asfalt da kalabilir ve 300,000 den fazla araç istatistiği tutar. Bilgisayara yüklenecek HDM yazılımı sayesinde, ölçüm sonucunda elde edilen tüm verilere rahatlık ile ulaşılabilir ve depolanır.



Şekil 6.27. Mobil trafik analiz cihazı

QTT NC 200 trafik analiz ölçüm cihazı teknik özellikler bakımından aşağıdaki özelliklere sahiptir.

Taşıt detektör tipi: GMR manyetik çip. (VMI)

İletilen bilgiler: Araç sayımı, Araç hızı, Araç uzunluğu, Zemin sıcaklığı

Mikroçip: Motorola CMOS

Gerçek zaman saati: Yıl, Ay, Gün, Saat, Dakika, Saniye.

Güç Kaynağı: Lityum iyon şarj edilebilir pil. 12 saat şarj süresi. 300,000 den fazla araç sayımı veya 21 gün çalışma süresi

Bağlantı: 57,000 bandı Standart RS-232 veya USB adaptör.

Hafıza: 3MB

Çalışma sıcaklığı: -30°C +75°C arası

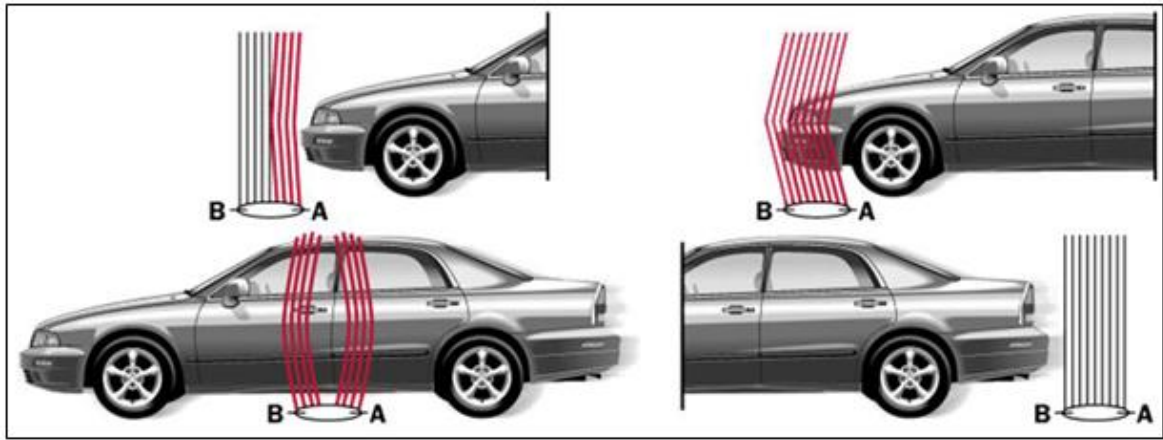
Dış Cephe: Sıkıştırılmış alüminyum

Boyut: 181mm x 118mm x 12.7mm

Ağırlık: 635g

Kullanım Şekli: Şerit ortasına monte edilerek kullanılır. Her şerit için bir adet monte edilmelidir.

Cihaz sensörlerinin araç hareketlerini algılayıp manyetik görüntüleme yapması Şekil 6.28'deki şekilde gerçekleşmektedir.



Şekil 6.28. NC 100-200 cihazı sensörlerinin araç hareketlerini manyetik görüntüleme

Şekil 6.28'de görüldüğü üzere sensör, A aracının geldiğini fark eder ve prosedür başlar. NC 100-200, araç sensörlerin üzerine yaklaştığı zaman, aracın yönü hakkında yorum yapar. Araç sensörlerin ikisinin de üstünde konumlandığında, Sensör B harekete geçer. Cihaz Sensör A ve Sensör B den gelen verileri karşılaştırarak taşıtın hızını monitör eder. Taşıt cihazın üzerinden geçtikten sonra sensör aracın uzunluğunu tespit eder. Kablo bağlantısı ve ek bir bağlantıya gerek yoktur. Araç sayımında %99 doğru netice ile ölçüm gerçekleşir. Araç hızı tespiti ve araç uzunluğu tespitinde %90 doğru netice verir. 300,000 den fazla araç sayımı 21 günlük çalışma süresinde gerçekleşmektedir. Ayrıca bu süre zarfında asfalt sıcaklığı tespiti yapılmaktadır. Yapısında şarj edilebilir iyon pil kullanılmaktadır. Kauçuk koruması sayesinde uzun ömürlüdür. Bakım gerektirmemektedir.

Şekil 6.29'da trafik ölçüm cihazının farklı güzergahlardaki yerleşimi görülmektedir.



Şekil 6.29. Mobil trafik analiz cihaz kurulumu

Trafik analiz ölçüm cihazıyla ilgili Loop yerine NC 100-200 kullanılması için en önemli iki neden; Amerika da yapılan hız testlerinde NC 100-200 ve Loop karşılaştırılması yapılmıştır. 3 farklı araç ile 30 geçiş yapılmıştır. Araçların 60km/sn sabit hızda geçiş yapmaları sağlanmıştır. Loop hızı ortalama 40km/sn verirken, geçiş sayısını 17 olarak monitör kayıt etmiş, NC 100–200 ise 57km/sn hız ve 30 geçiş sayısı kayıt edilmiştir. Bu durum NC100-200 ile daha sağlıklı sonuç alındığını göstermiştir.

Bilgisayara yüklenecek Şekil 6.30'daki HDM yazılımı sayesinde, ölçüm sonucunda elde edilen tüm verilere rahatlık ile ulaşılabilir ve depolanır.



Şekil 6.30. HDM yazılım programı

HDM yazılım programında isteğe bağlı olarak aşağıdaki raporlar ve grafikler elde edilebilir.

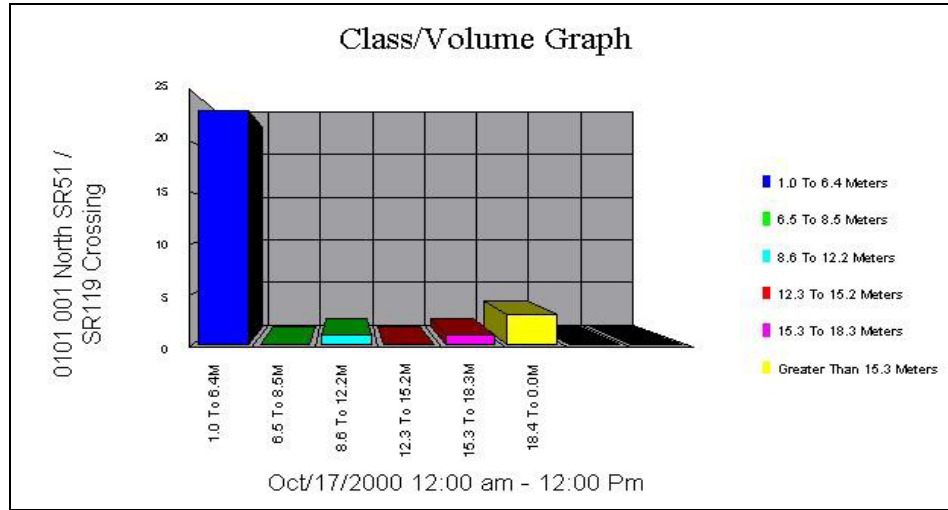
A) Raporlama:

- Zaman aralıklarındaki araç sayısı, ortalama hız, yol sıcaklığını
- Zaman aralıklarındaki araç sayısı, ortalama araçlar arası geçiş süresi (saniye)
- Zaman aralıklarındaki belirlenen sınıflardaki araç sayıları
- Zaman aralıklarında belirlenen hız aralıklarındaki araç sayıları
- Zaman aralıklarında araç sınıflarının ortalama hızları
- Summary (Özet rapor)

B) Grafikler:

- Belirlenen hız aralıklarındaki araç sayılarını gösterir.
- Belirlenen zamanlardaki araç sayılarını gösterir.
- Belirlenen sınıflara göre araçların yüzdelerini gösterir.

Grafik çıktıları Şekil 6.31'deki gibidir.



Şekil 6.31. Sınıf /araç sayısı grafiği

Şekil 6.32'de trafik analiz cihazının şarj edilmesi gösterilmiştir.



Şekil 6.32. Trafik analiz cihazındaki bataryaların şarj edilmesi

Trafik ölçüm cihazları 15 günlük süre zarfında verileri kaydederek deşarj olmakta dolayısıyla yazılım programına elde ettikleri verilerin kaydedilmesi ve programlanarak kullanıma hazır hale gelmesi için en az 24 saat şarj edilmesi gerekmektedir.

Şekil 6.33'te verilerin trafik ölçüm cihazından bilgisayar ortamına aktarılması gösterilmektedir.



Şekil 6.33. Trafik analiz cihazı verilerinin aktarılması

6.4.2. Karot Numunelerinin Alımı

Arazideki sıkıştırmanın kontrolü amacıyla yapılan deneyler, kaplamadan alınan karotlar veya kesilen numuneler üzerinde laboratuvar ortamında gerçekleştirilmekte ya da nükleer bir yoğunluk aleti kullanılarak arazide yoğunluk performansı tespitleri yapılmaktadır.

Karotlar, kaplamadan kesilip çıkarılan silindirik numuneler olup, kaplama tabakasının yoğunluğunun kontrolü için laboratuvarında test edilmektedir.

Yoğunluk ölçümleri yapılması için araziden karot ile silindirik asfalt numuneleri alınırken ve taşınırken gerekli özen gösterilmelidir. Numuneler elmas uçlu karot alma

makinası ile elde edilerek, kaplama ve numunelerin hasar görmesi veya bozulması en aza indirgenmektedir. Isı kaybını önlemek için yalıtımlı kaplarda ve mümkün olduğunca hızlı taşınmalıdır [191].

Karot numuneleri Şekil 6.34'te gösterilen şekilde alınmıştır.



Şekil 6.34. Karot makinesi ile silindir asfalt numunesi alınması

6.4.3. Nükleer Yoğunluk Cihazı Deneyleri

BSK'larla hazırlanan yollarda uygulanan arazi deney yöntemlerinden nükleer yoğunluk cihazıyla yapılan yoğunluk okumaları, yoldan alınan karot numunelerine yönelik yapılan laboratuvar deneyi okumalarıyla karşılaştırılarak ilişkilendirilmelidir. Her bir karışım dizaynı veya karışımda önemli bir değişiklik durumunda yeni bir korelasyon katsayısı gerekir.

Nükleer yoğunluk aygıtları, karot numunelerine göre avantajlara sahiptir. Kullanımı pratik, hızlı ve tahripkar olmayan özelliktedir.

Deneylerden elde edilen yoğunluk değerlerinin ortalaması, hedef yoğunluğun belirlenmesi için kullanılan metoda bağlı olarak; laboratuvar yoğunluğunun %96'sı, maksimum teorik yoğunluğun %92'si, deneme kesimi yoğunluğunun %99'u gibi kriterlerden bazılarını sağlamalıdır [191].

Gerçekleştirilen çalışmada nükleer metod olarak Şekil 6.35'teki Troxler 4640-B ince tabaka ölçme aleti kullanılmıştır. Troxler 4640-B cihazı, gama ışınlarının (foton) geri saçılmalarını kullanarak yoğunluk ölçümü yapmaktadır. Yoğunluk ölçümlerin alınmasında Sezyum-137 kaynağı kullanılır. 8 mCi (mili cüri) Sezyum-137 kaynağından çıkan gama

fotonları, asfalt tabakasının içerisine girmektedir. Bu ışınlar malzemenin elektronlarıyla elastik veya inelastik çarpışma yaparlar veya elektronlar tarafından yutulurlar. Troxler 4640-B, geri saçılan fotonları ölçmek için 2 adet G-M (Geiger-Muller) dedektör kullanır. Detektörlere ulaşan fotonlar önceden seçilen bir zaman aralığında sayılırlar. Sayılan foton sayısı, malzemenin yoğunluğuyla doğrudan bağlantılıdır. Alet üzerindeki elektronik okuma ekranından bu sayımları kullanarak üzerinde bulunduğu asfalt tabakasının yoğunluğunu hesaplar ve program yüklü cihaz ekranından görüntülenerek hafızasına kaydeder [239].



Şekil 6.35. Nükleer test cihazı ile yoğunluk ölçümü

6.4.4. Schmidt Çekici ile Yapılan Arazi Deneyleri

Betonların iç bünyesindeki mukavemeti tespit etmek için karot numuneleri alınıp, basınç deneyleri uygulanmaktadır. Sertleşmiş beton mukavemeti tayininde tahribatlı ve tahribatsız deney metotları birlikte uygulanmaktadır. Sertleşmiş betonda karot numunesi alınmadan önce beton test çekici ile yüzey sertliği deneyleri yapılmaktadır [240].

Sıvası kaldırılan beton yüzeyinden 3 cm ara ile Schmidt çekici ile yükleme yapılarak ölçü alınmakta ve çekiç üzerindeki değeri okunmaktadır. Yaklaşık on değerın ortalaması alınmaktadır [241].

BSK'larla hazırlanan yol kaplamalarında da asfalt betonu kaplamaların fiziksel ve mekanik özelliklerini tespit etmek için karot numuneleri alınmakta ve laboratuvar ortamında bir takım test metotları uygulanarak mukavemetine yönelik parametreler elde edilmektedir.

Çalışma kapsamındaki BSK'larla hazırlanan katkılı ve katkısız yol kaplamalarında, karot numuneleri alınmadan önceki 1.,4.,8. ve 12. aylarda numuneye ait ölçüm yerlerinden Şekil 6.36'daki şekilde Schmidt test çekici ile yüzey sertliği deneyleri yapılarak, geri

tepme değerleri tespit edilmiştir. Yüzey sertliği deney metodu ile asfaltın elastikiyetinin tespiti ve birkaç mm derinlikteki yüzeyi test ettiğinden dolayı sadece üst tabakalara yakın kısımlardaki basınç mukavemeti hakkında bilgi vermektedir. Yüzey sertliği deney sonuçları; kullanılan malzeme ve cihaz özellikleri, ortam koşulları, testin uygulama şekli gibi özelliklerden etkilenmektedir.

Beton test çekici ile numune almadan önce uygulanan geri tepmeli beton test çekici deneyinde, 120mm'den daha ince yapı bileşenlerinde titreşimin neden olduğu olumsuz yöndeki değişiklik yaratan ölçüm sonuçlarının yaşanmaması için narin yapılarda deney desteğe ve köşelere yakın yerlerde uygulanmaktadır. Benzer durum asfaltlarda da olduğundan bu husus dikkate alınmıştır [240].



şekil 6.36. Schmitd çekiciyle yüzey sertliği ölçümü

6.4.5. Tekerlek İzi Ölçümleri

Tekerlek izinin esas nedeni, aşınma, binder tabakalarının hepsinin ya da birinin stabilite yetersizliği bazen de alt temelin stabilite yetersizliğidir [242].

Tekerlek izi oluşumu, yolu kullananlar için de ciddi bir güvenlik meselesidir. Su tekerlek izlerinde biriktiğinde, su yastığı olayı için potansiyel oluşturur. Su yastığı olayı, kaplama ile lastik arasında ince bir su tabakası oluşması ve bunun neticesinde lastiğin yüzeyle temasını kaybetmesidir. Bu olay direksiyon hakimiyetinin kaybedilmesiyle sonuçlanabilir. Aynı şekilde şerit değiştirme durumunda da aynı sorun yaşanabilmektedir [243,244].

Laboratuvar tekerlek izi cihazı BSK'nın üzerinde tekrarlı olarak geçen tekerin meydana getirdiği oluklanmayı ölçmektedir. Daha sonra bu oluklanma arazide meydana gelebilecek tekerlek izi ile ilişkilendirilmektedir. Kabul edilebilir sonuçlar alınabilmesi için arazi

şartlarını temsil edecek y¼kleme, teker geçiş sayısı ve sıcaklık gibi parametrelerin çok iyi belirlenmesi gerekmektedir. Kaplamanın tekerlek izi direncini belirlemede kullanılan Asphalt Paving Analyzer, French Pavement Rutting, ve Hamburg Wheel-Tracking deney cihazları, kaplamanın yıllar içinde maruz kalacağı trafik şartlarını laboratuvar ortamında simule eden ve bu şartların etkisini saatler mertebesine indiren hızlandırılmış deneylerdir [226,245].

Sunulan çalışmada, sadece katkılı ve katkısız olarak hazırlanan asfalt betonu kaplamalarda 1 yıllık s¼re zarfında 3 aylık periyotlarda taşıt tekerleğinin geçtiği b¼lgelerden belirli aralıklarla şekil 6.37'deki gibi ahşap malzeme yerleştirilerek hassas kumpas yardımıyla tekerlek izinin meydana getirdiği oturma derinlikleri ¼l¼lm¼řt¼r.



şekil 6.37. Asfalt betonu kaplama tekerlek izi ¼l¼m¼

7. DENEYSEL ÇALIŞMA

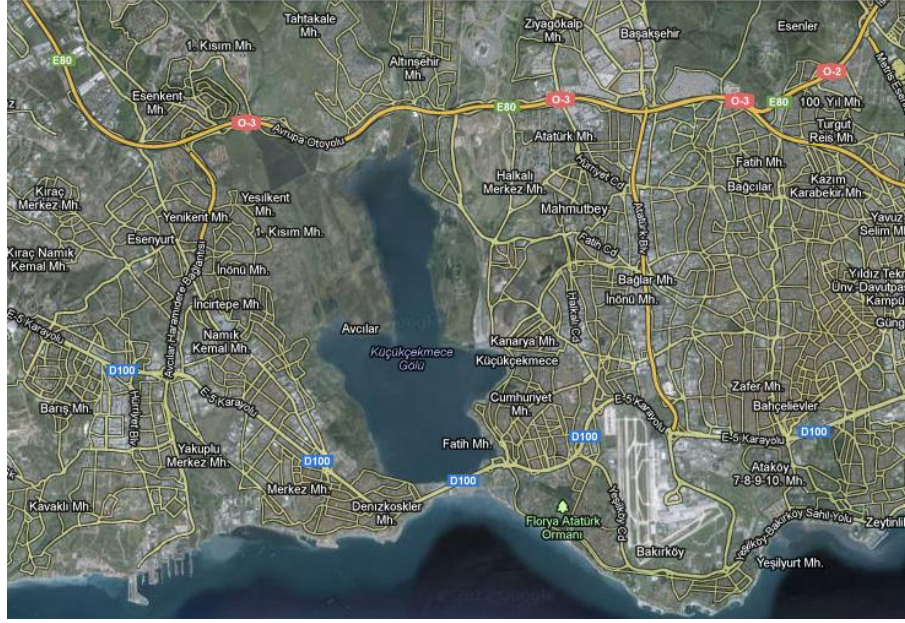
Deneysel çalışmada; katkısız ve SBS katkılı bitümlerin BSK'larda kullanımı incelenerek, laboratuvar ortamında ve arazideki performanslarının değerlendirilmesi ile sonuçların karşılaştırılması yapılmıştır.

Deneysel çalışma; arazi ve laboratuvar deneylerinden oluşmaktadır. Çalışmalarda kullanılan katkılı ve katkısız BSK'ların elde edildiği plant şantiyelerinden alınan ve laboratuvar da deneylere tabi tutulan BSK'ların karşılaştırılmaları yapılmıştır. Ayrıca BSK'ların arazide uygulandıktan sonraki dönemde yapılan arazi ve laboratuvar deneysel çalışmaları da dikkate alınarak karışımların zaman içindeki mevsimsel değişimleri ve trafik gibi çevresel etkilere bağlı davranışları incelenmiştir.

7.1. Deneysel Çalışma Uygulama Alanı

Çalışmada uygulama alanı sahası olarak, İstanbul İli Küçükçekmece Belediyesi sınırları içerisinde yer alan TOKİ ve diğer konut projelerinin yoğun olarak yapılmaya başlandığı, yeni yerleşim bölgelerindeki tali yollardan biri seçilmiştir.

Şekil 7.1'deki uydu görüntüleri incelendiğinde İstanbul İli Küçükçekmece Bölgesi özellikle son yıllarda yeni konut ve işyeri yerleşim bölgelerinin yoğun olduğu ve İstanbul'daki kentsel dönüşüm kapsamında TOKİ Halkalı toplu konutlarının yapıldığı yerleşim alanını içine almaktadır. 2012'de yapılması düşünülen bölge hastanelerinin, yeni yapılacak karayolu ve metro güzergahlarının da bu ilçe sınırları içerisinde yer alması bölgenin önemini arttırmaktadır.



Şekil 7.1. İstanbul İli Küçükçekmece İlçesi karayolu ağı uydu görüntüleri [246].

Çalışma kapsamında Küçükçekmece Belediyesi Burgaz Mahallesi'nde yapılan asfalt çalışmalarında Burcu Sokak'ta uygulanan aynı yol güzergahındaki 7m. genişlikteki tali yol incelenmiş, temel tabakası üzerine uygulanan katkılı ve katkısız BSK'nın yaklaşık 50m.'lik kısmı ile bu kısımdan alınan numuneler çalışmalarda arazi ve laboratuvar deneylerine tabi tutularak kullanılmıştır.

Şekil 7.2'de deneysel çalışmanın yürütüldüğü mahal yer almaktadır.



Şekil 7.2. Küçükçekmece İlçesi Yarımburgaz Mahallesi Burcu Sokak uygulama yol sahası [247].

7.2. Deneysel Çalışma Safhaları

Deneysel çalışma, laboratuvar ve arazi deneyi safhalarından oluşmaktadır. Laboratuvar çalışmaları bitüm, agrega ve karışım deneylerinden oluşmaktadır. Arazi deneyleri ise saf ve SBS modifiyeli BSK karışım olarak tasarlanan yol güzergahındaki trafik ve yüzey sıcaklığı değerlerinin ölçümü, yüzey sertliği, sıkıştırma, tekerlek izi ölçümü ile yoldan temin edilen karot numunelerine ait dayanım ve performans deneylerini kapsamaktadır.

7.2.1. Laboratuvar Çalışmaları

Çalışmanın ilk aşamasında karışımlarda kullanılacak bitüm ve agrega ile ilgili fiziksel özelliklere yönelik deneyler uygulanmıştır. Bitüm olarak B70/100 saf asfalt çimentosu ve %5 SBS katkılı modifiye oranı kullanılmış, anılan bağlayıcılara yönelik bağlayıcı deneysel çalışmaları yürütülmüştür. Agrega olarak kalker türü kırmataş malzeme kullanılmıştır. Bu agregalar İstanbul İli Cebeci Bölgesi'ndeki taş ocaklarından elde edilerek agregaların plant şantiyesinde kırılmasıyla karışımlarda kullanılmıştır. Saf ve modifiyeli BSK karışımlarda kullanılacak agregaların fiziksel ve mekanik özelliklerinin tespiti yapılmıştır. Ayrıca BSK kaplama tabakasının yapıldığı uygulama sahasında zemin durumuyla ilgili deneysel çalışmaların değerlendirmesi yapılmış ve güzergah boyunca temel tabakasında kullanılan agregaların fiziksel özelliklerini tespit etmek için agrega karışım numuneleri alınmıştır.

Çalışmada kullanılacak modifiyeli ve modifiyesiz BSK'ların temini, konkasör ve plent şantiyelerinin yoğun olduğu 1.Cebeci yolu taş ocakları mevki Sultançiftliği bölgesinde yer alan firmalardan sağlanmıştır. Karot numunelerinin alındığı kesimlerdeki malzeme ve karışım özellikleri, kaplama tabakalarının yapımından önce Asfaltsan ve Atis firmaları, Bimtaş ve Karayolları Genel Müdürlüğü laboratuvarlarındaki deneysel çalışmalardan tespit edilen ve hazırlanan karışım, tasarım raporlarından alınmıştır.

Çalışmanın ikinci aşamasında optimum bitüm oranında plentlerden temin edilen BSK karışımları ile Fırat ve Dicle Üniversitesi ulaştırma laboratuvarında test amaçlı Marshall briket numuneleri hazırlanmıştır. Ayrıca uygulama sahasından belli periyotlarda temin edilen karot numunelerinde, SBS'li ve katkısız asfaltın optimum içeriklerinin belirlenmesi, agrega gradasyonu ve fiziksel özellik durumunun belirlenmesine yönelik deneyler yapılmıştır. Laboratuvarda hazırlanan ve yol güzergahından karot alınarak temin edilen numunelere Marshall test metodu uygulanarak optimum bitüm oranının belirlenmesi, Marshall stabilite ve akma, kalıcı Marshall oranı, indirekt çekme (ITS), indirek çekme rijitlik modülü (ITSM), indirekt çekme yorulma deneylerine tabi tutularak saf bitüm içinde SBS katkı kullanımı etkisi geniş bir aralıkta incelenmiştir. Böylece BSK'ların katkısız ve SBS katkılı olarak kullanılması ve yola uygulanması, 1 yıllık süre zarfında çevre ve iklim koşulları dikkate alınarak taşıt trafiğindeki performans karşılaştırılması yapılmış, arazi ve laboratuvar deneysel çalışmalarından elde edilen parametrelerden faydalanarak modelleme yapıp, performansları değerlendirilmeye çalışılmıştır.

7.2.1.1. Bitümlü Bağlayıcı Deney Sonuçları

Saf bağlayıcı olarak TÜPRAŞ rafinerisinden temin edilen B50/70 sınıfı asfalt çimentosu kullanılmıştır. Bağlayıcı modifikasyonunda Shell Bitumen şirketi tarafından üretilen Stiren-Butadien-Stiren (SBS) blok kopolimer ihtiva eden KRATON D 1101 kullanılmıştır. SBS oranı %5 olarak sabit tutulmuştur.

Asfalt çimentosu üzerinde TS 1081 EN 12591 şartnamesinde yer alan standart deneyler uygulanarak bitümlü bağlayıcının kullanılabilirliği belirlenmiştir [248].

TS 119'da belirtilen fakat yeni kaplama sınıfı bitümler şartnamesinde yer almamasına rağmen düktilite deneyi yapılmış, bu değer 100 cm'den büyük olduğu tespit edilmiştir [249].

Penetrasyon İndeksi (PI), bitümlü bağlayıcıların ısıya karşı duyarlılığını tespit etmek amacıyla kullanılmaktadır. Penetrasyon İndeksi, standart penetrasyon ve yumuşama noktası deney sonuçları kullanılarak belirlenmektedir (Formül 7.1–7.2). Denklemdeki P_{25} , bitümün 25°C’deki penetrasyon değerini, T_{YN} ise yumuşama noktasını göstermektedir. Bitümlü bağlayıcıların ısıya karşı duyarlılıkları arttıkça PI değerleri azalmaktadır. Ullidtz’e göre Penetrasyon İndeksi’nin -2’den küçük olması bitümün ısıya çok duyarlı olduğunu, +2’den büyük olması ise ısıya karşı az duyarlı olduğunu göstermektedir [250].

Bağlayıcı deney sonuçları ve şartname limitleri Tablo 7.1’de verilmiştir. Elde edilen sonuçlardan bitümlü bağlayıcının şartname limitlerini sağladığı belirlenmiştir.

$$A = \frac{\log 800 - \log P_{25}}{T_{YN} - 25} \quad (7.1)$$

$$PI = \frac{20 - 500A}{1 + 50A} \quad (7.2)$$

Tablo 7.1. Bitümlü bağlayıcı deney sonuçları

Özellikler	Standart	Modifiyesiz Deney Sonuçları	Modifiyeli Deney Sonuçları	Şartname Limitleri
Penetrasyon, (0,1 mm, 100 g, 5 s)	TS 118 EN 1426	68	61	50-70
Yumuşama Noktası, (°C)	TS 120 EN 1427	51,7	54	46– 54
Penetrasyon İndeksi, (PI)	-	-0,015	0,249	-
Fraas Kırılma Noktası, (°C)	TS EN 12593	-17,0	-17,5	< - 8
Düktilite, (cm)	TS 119	> 100	> 100	> 100
Özgül Ağırlık, (gr/cm ³)	TS 1087	1,022	1,017	1,0–1,1

Tablo 7.1 incelendiğinde, modifiyesiz ve modifiyeli bitümlerin penetrasyon indeksi bakımından ısıya duyarlı olduğu belirlenmiştir. KTŞ limitlerinin üzerinde bir değere sahip oldukları diğer özellikler bakımından şartname limitlerini sağladığı görülmüştür.

7.2.1.2. BSK Karışımlarda Kullanılan Agregaların Özellikleri

Çalışmada agrega olarak İstanbul Cebeci taş ocaklarından çıkarılan daha sonra Sultançiftliği Habibler ve Cebeci Bölgelerinde yer alan Asfalt Fabrikaları’na nakledilip, kırmataş haline getirilen ve buradan temin edilen kalker (kireçtaşı) türü kırmataş

malzemesi kullanılmıştır. Agreg a karışımının No.4 elek üzerinde kalan kaba kısmı yıkanarak tozdan arındırılmış bir şekilde deneylerde kullanılmıştır. Ayrıca çalışmada, maksimum tane boyutu 19 mm, nominal maksimum tane boyutu 12.5 mm olan agreg a gradasyonu Tip 2'ye göre seçilmiştir. Karışımlarda kullanılacak agreg a yığınlarına ASTM ve AASHTO deney standartlarına göre fiziksel özellikleri tespit edilerek şartname kriterleri ile karşılaştırılmış ve bu kriterlerin sağlandığı görülmüştür. Katkısız ve modifiyeli BSK'larda kullanılan kalker agreg asının karışımlarda kullanılan agreg a gradasyonu Tablo 7.2, Tablo 7.4, fiziksel özellikleri ise Tablo 7.3 ve Tablo 7.5'te verilmiştir.

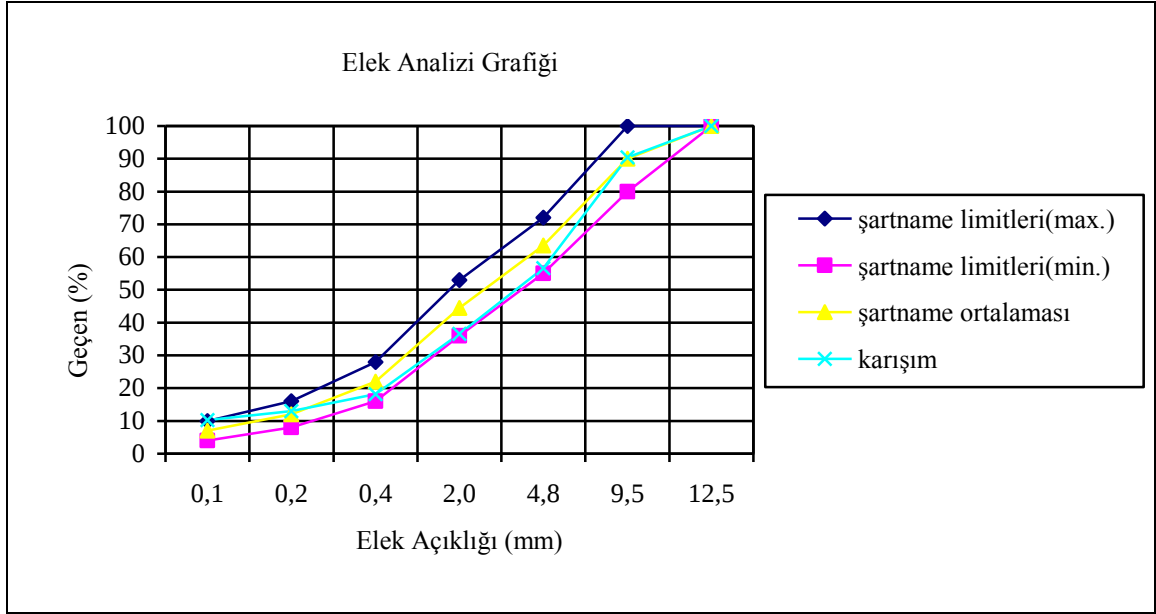
Tablo 7.2. BSK aşınma tabakası agreg a gradasyonu

Ocak Adı		Çakırlar	Çakırlar	Çakırlar	Karışım	Toleranslı		Aşınma Tip 2		Ortalama
Karışım Oranı(%)		51	44	5		Karışım		Şartname		
Elek Açıklığı		1/2"- no.4	No. 4-0,075	filler		Limitleri		Limitleri		
mm.	inç.	%Geçen	%Geçen	%Geçen	%Geçen	%Geçen	%Geçen	%Geçen	%Geçen	%Geçen
12,5	1/2"	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100	100	100,0
9,5	3/8"	81,2	100,0	100,0	90,4	86,4	94,4	80	100	90,0
4,75	No. 4	14,9	100,0	100,0	56,6	55,0	60,6	55	72	63,5
2	No. 10	0,4	71,3	100,0	36,6	36,0	39,6	36	53	44,5
0,425	No. 40	0,0	29,9	100,0	18,2	16,0	21,2	16	28	22,0
0,18	No. 80	0,0	19,2	91,9	13,0	10,0	16,0	8	16	12,0
0,075	No. 200	0,0	13,9	83,3	10,3	8,3	10,0	4	10	7,0

Tablo 7.2'de granülo metrik bileşimleri verilen agreg a malzemesinin ağırlıkça 1/2"-No.4 elek açıklığı arasının %51'i kırmataş, No.4-200 elek arasının %44'ü ince ve No.200 elek altının %5'i taş tozu olarak karışım oranlarında kullanıldığında, meydana gelen karışım granü metrisi, KTŞ aşınma tabakası Tip II sınırları içerisinde kalmaktadır.

Tablo 7.2'de görüldüğü üzere bu karışım da ağırlıkça; kaba agreg a %51, ince agreg a %44, filler %5,0 oranında bulunmaktadır.

Aşınma tabakası Tip II elek analizi grafiği Şekil 7.3'te gösterilmiştir.



Şekil 7.3. BSK aşınma tabakası tip II elek analizi grafiği

Şekil 7.3'te BSK aşınma tabakası tip II elek analizi grafiğinde, karışım gradasyonunun minimum şartname limiti ve şartname ortalaması arasında kaldığı bazı kısımlarda minimum şartname limitlerine yakın ve teğet olduğu görülmüştür.

Tablo 7.3. BSK aşınma tabakasında kullanılan agreganın fiziksel özellikleri

Özellikler	Standart	Kaba	İnce	Filler	Şartname sınırı
Aşınma Kaybı, % (LosAngeles)	TS 3694 ASTM C-131	20,5	-	-	Maks. 30
Donma Kaybı, % (Na ₂ SO ₄)	TS 3655 ASTM C-88	1,2	-	-	Maks. 10
Su Absorpsiyonu, (%)	TS 3524 ASTM C127	0,38	0,88	-	Maks. 2
Soyulma Mukavemeti, (%)		60-70			Min. 50
Yassılık İndeksi, (%)	BS 812	16,1			Maks. 30
Özgül Ağırlık, gr/cm ³	ASTM C127	2,733	-	-	
Özgül Ağırlık, gr/cm ³	ASTM C128	-	2,678	-	
Özgül Ağırlık, gr/cm ³	ASTM D854	-	-	2,764	
Kaba Agrega Köşeliliği, (%)	ASTM D-5821	97/96	-	-	Min. 95/90
İnce Agrega Köşeliliği, (%)	AASHTO T304	-	49	-	Min. 45
Yassı ve Uzun Daneler, (%)	ASTM D-4791	3	-	-	Maks. 10
Kil İçeriği, (Kum Eşdeğerlik), (%)	AASHTO T176	-	53	53	Min. 45
Plastisite		N.P.			N.P.
Zararlı Maddeler, (%)	ASTM C-142	Bulunmamıştır			Maks. 0,5

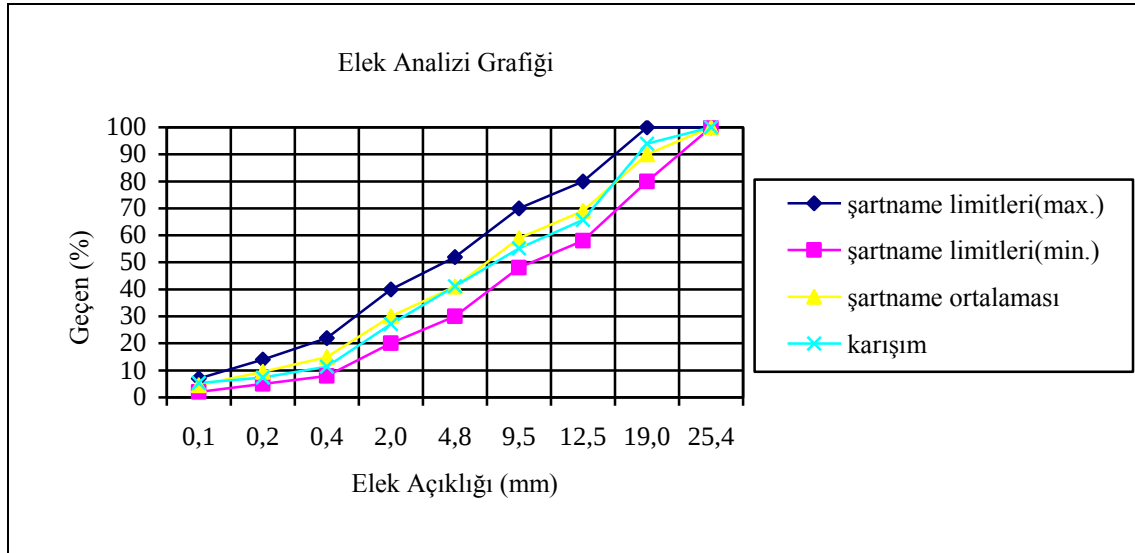
Tablo 7.3'te BSK'da kullanılan agregalar fiziksel özellikler bakımından şartname sınırı içerisinde kalmıştır.

Tablo 7.4. BSK binder tabakası agrega gradasyonu

Ocak Adı		Çakırlar	Çakırlar	Çakırlar	Karışım	Tolerans Karışım Yüzdesi		Binder Tabakası Şartname Limitleri		ortalama
Karışım Oranları (%)		Taş Ocağı	Taş Ocağı	Taş Ocağı						
		41	21	38	%Geçen	%Geçen		%Geçen		%Geçen
Elekt Açıklığı		1"-1/2"	1/2"-no.4	No.4-0						
mm.	inç.									
25,4	1"	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100	100	100,0
19,1	3/4"	85,1	100,0	100,0	93,9	89,9	97,9	80	100	90,0
12,5	1/2"	16,3	100,0	100,0	65,7	61,7	69,7	58	80	69,0
9,5	3/8"	0,4	81,2	100,0	55,2	51,2	59,2	48	70	59,0
4,75	No.4	0,1	14,9	100,0	41,2	37,2	45,2	30	52	41,0
2	No.10	0,0	0,4	71,3	27,2	24,2	30,2	20	40	30,0
0,425	No.40	0,0	0,0	29,9	11,4	8,4	14,4	8	22	15,0
0,18	No.80	0,0	0,0	19,2	7,3	5,0	10,3	5	14	9,5
0,075	No.200	0,0	0,0	13,9	5,3	3,3	7,0	2	7	4,5

Tablo 7.4'te görüldüğü üzere bu karışımda ağırlıkça; kaba agrega %62, ince agrega ve filler toplamı %38 oranında bulunmakta ve binder tabakası şartname limitleri arasındadır.

Binder tabakasına ait elek analizi grafiği Şekil 7.4'te gösterilmiştir.



Şekil 7.4. BSK binder tabakası elek analizi grafiği

Şekil 7.4'te katkısız asfalt betonu binder tabakası elek analizi grafiğinde karışım gradasyonunun şartname limitleri içinde kaldığı ve şartname ortalamasına çok yakın olduğu görülmüştür.

Tablo 7.5. BSK binder tabakasında kullanılan agreganın fiziksel özellikleri

Özellikler	Standart	Kaba	İnce	Filler	Şartname sınırı
Aşınma Kaybı, % (LosAngeles)	TS 3694 ASTM C-131	20,5	-	-	Maks. 35
Donma Kaybı, % (Na ₂ So ₄)	TS 3655 ASTM C-88	1,2	-	-	Maks. 12
Su Absorpsiyonu, %	TS 3526 ASTM C-127	0,38	0,88	-	Maks. 2,5
Soyulma Mukavemeti (%)		60-70			Min. 50
Yassılık İndeksi (%)	BS 812	16,1			Maks. 35
Özgül Ağırlık, gr/cm ³	ASTM C-127	2,733	-	-	
Özgül Ağırlık, gr/cm ³	ASTM C-128	-	2,678	-	
Özgül Ağırlık, gr/cm ³	ASTM D-854	-	-	2,764	
Kaba Agregası Köşeliliği, (%)	ASTM D-5821	97/96	-	-	Min. 95/90
İnce Agregası Köşeliliği, (%)	AASHTO T-304	-	49	-	Min. 45
Yassı ve Uzun Daneleşim, (%)	ASTM D-4791	3	-	-	Maks. 10
Kil İçeriği, (Kum Eşdeğerlik), (%)	AASHTO T-176	-	53	53	Min. 45
Plastisite		N.P.			N.P.
Zararlı Maddeler, (%)	ASTM C-142	Bulunmamıştır			Maks. 0,5

Tablo 7.5'te BSK binder tabakasında kullanılan agregalar, aşınma tabakasında kullanılan agregalarla aynı fiziksel özellikte olup, şartname sınırı içerisinde kalmıştır.

7.2.1.3. Temel Tabakasında Kullanılan Agregaların Özellikleri

Çalışma sahasında yol güzergahındaki zemin durumuyla ilgili deneysel çalışmaların değerlendirmesi yapılmış ve güzergah boyunca temel tabakasında kullanılan agregaların fiziksel özelliklerini tespit etmek için agrega karışım numuneleri alınmıştır.

Şekil 7.5'te gösterilen yol üst yapısında granüler temel tabakası kullanılmıştır.



Şekil 7.5. Uygulama sahası yol üst yapısı granüler temel tabakası

Çalışma sahasında yol üst yapısına ait temel tabakasında kullanılan kırma taş agregalara Şekil 7.6'daki İ.B.B. Bimtaş Laboratuvarında, TS 1900-1, AASHTO T-27 ve TS EN 932-1 standartlarına uygun olarak elek analizi, atterberg limiti, ve modifiye proktor deneyleri uygulanarak elde edilen verilerin şartname limitleriyle karşılaştırılması yapılmıştır.



Şekil 7.6. Bimtaş malzeme laboratuvarı

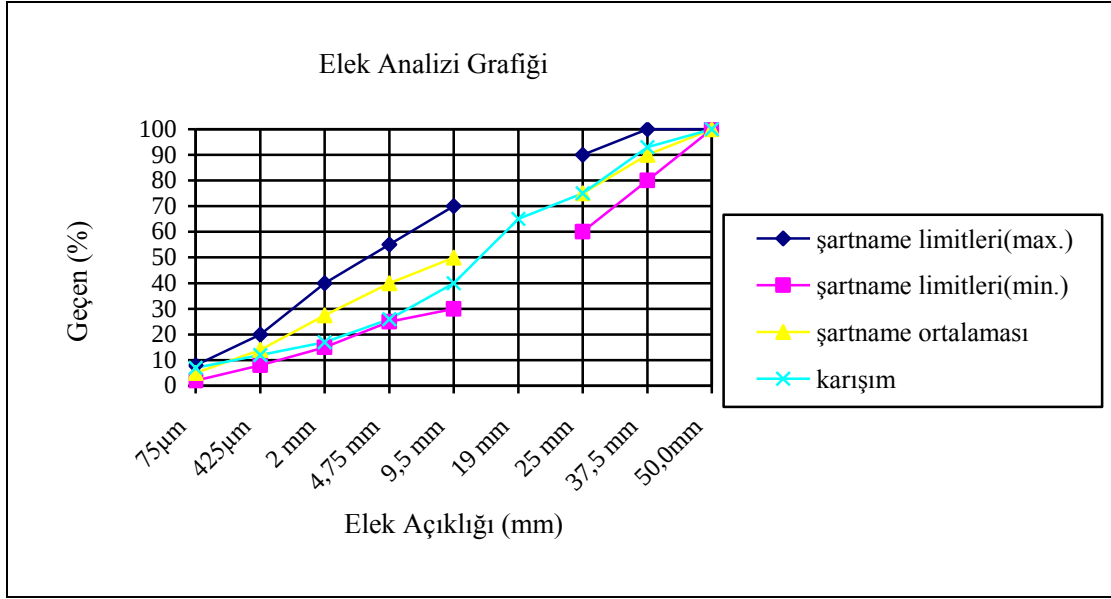
KTŞ'ye göre; temel tabakası kalınlığı 20 cm veya daha fazla ise tabaka A, B veya C tipi granüler temel malzemelerinden birisi ile oluşturulacaktır.

Tablo 7.6'da KTŞ'ye göre; asfalt betonu ile kaplanacak yollarda granüler temel malzemesi gradasyonu A, B tiplerinden birine uygun olacaktır [168].

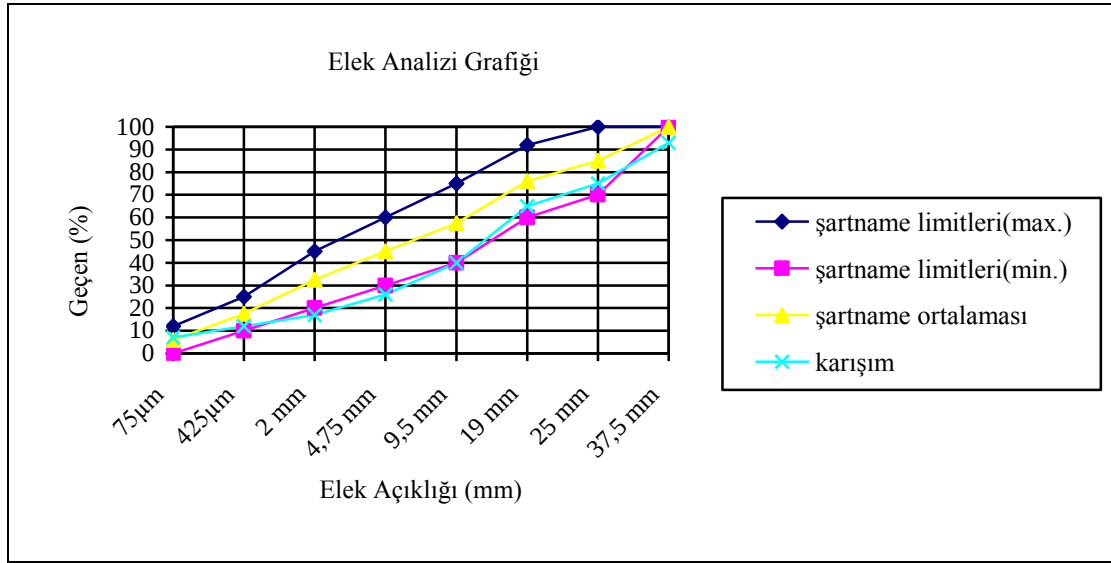
Tablo 7.6. Granüler temel tabakası elek analizi sonuçları

Elek Boyutu		Deney Sonuçları Elek Analizi % Geçen	Şartname Limitleri % Geçen		
mm	inç		A	B	C
50,0 mm	(2")	100	100		
37,5 mm	(1 1/2")	93	80-100	100	
25 mm	(1")	75	60-90	70-100	100
19 mm	(3/4")	65	-	60-92	75-100
9,5 mm	(3/8")	40	30-70	40-75	50-85
4,75 mm	(No.4)	26	25-55	30-60	35-65
2 mm	(No.10)	17	15-40	20-45	25-50
425 µm	(No.40)	12	8-20	10-25	12-30
75 µm	(No.200)	7	2-8	0-12	0-12

Şekil 7.7 ve Şekil 7.8'de granüler temel tabakasının A ve B tipi gradasyon limitlerine göre elek analizi yapılmıştır.



Şekil 7.7. Granüler temel tabakası A tipi gradasyon limitlerine göre elekt analizi



Şekil 7.8. Granüler temel tabakası B tipi gradasyon limitlerine göre elekt analizi

Şekil 7.7 ve Şekil 7.8'deki elekt analizi sonuçlarına göre granüler temel tabakasında kullanılan agregaların tip A gradasyon limitlerine uymadığı, tip B gradasyon limitlerinde ise şartname ortalaması altında ve minimum şartname limit değerlerine yakın olarak kısmen uymaktadır.

Granüler temel tabakasında kullanılan kırmataş agrega fiziksel ve mekanik özellikleri sırasıyla Tablo 7.7 ve Tablo 7.9'da, ince agrega fiziksel özellikleri Tablo 7.8'de verilmiştir.

Tablo 7.7. Granüler temel agrega fiziksel özellikleri

Deney adı	Modifiye proktor		Atterberg limitleri		
Deney tipi	Maksimum kuru birim hacim ağırlık (t/m ³)	Optimum su içeriği (W _n), %	Likit limit (W _L), %	Plastik limit (W _p), %	Plastisite İndeksi (I _p), %
	2,30	5,9	25,5	14,9	10,6

Tablo 7.7’deki kırmataş agregaların fiziksel özelliklerinin tespitine yönelik uygulanan modifiye proktor deneyinde; optimum su içeriği %5,9 ve maksimum kuru birim hacim ağırlık 2,3 t/m³, plastisite indeksi ise %10,6 olarak tespit edilmiştir.

Tablo 7.8. İnce agrega fiziksel özellikleri

Deney adı	Deney standartı	Deney sonucu	Şartname limitleri
Likit limit, maksimum %	TS 1900 AASHTO T-89	25,5	25
Plastisite indeksi, maksimum %	TS 1900 AASHTO T-89	10,6	6

Tablo 7.8’de gösterilen ince agrega maksimum likit limit ve plastisite indeksi değerlerinin şartname limitlerini sağlamadığı görülmüştür.

Tablo 7.9. Granüler temel tabakası agrega mekanik özellikleri

Deney adı	Deney standartı	Deney sonucu	Şartname limiti
Modifiye proktor minimum sıkışma %	TS 1900 AASHTO T-180	205	98
Titreşimli tokmak minimum sıkışma %	TS 1900 BS 1377	210	98 95
Yoğunluk	TS 1900, AASHTO T 88	2,30-2,35	-
Los Angeles aşınma kaybı deneyi, maksimum %	TS-3694, AASHTO T-96	23	40
Yassılık indeksi, maksimum %	BS 812	32	40
Nem oranı	TS 1900	4,85	-

Tablo 7.9’da granüler temel tabakası agregaları mekanik özellikleriyle ilgili şartname limitlerini sağlamıştır.

7.2.1.4. Bitümlü Sıcak Karışım Özelliklerinin Belirlenmesi

Normal BSK karışımlar için Asfaltsan, SBS katkılı BSK'lar için ise Atis firmasına ait plantlerden malzeme temini sağlanmıştır. Binder ve aşınma tabakasında, kullanılacak bitüm, agrega ve karışım dizayn parametrelerini belirlemek için numuneler üzerinde yapılan deneyler Karayolları Genel Müdürlüğü 17. Bölge Müdürlüğü tarafından gerçekleştirilmiştir.

Şekil 7.9'daki plant şantiyelerinden BSK karışımlar temin edilmiştir.



Şekil 7.9. Asfaltsan ve Atis asfalt firması plant şantiyeleri

BSK'larda optimum bitüm oranı tespiti için Marshall test metodu uygulanmıştır. Kırma taş agregaların Karayolları tip II şartnamesine göre gradasyonu sağlanarak agrega karışımının B50/70 penetrasyon derecesinde belli bitüm yüzdesi oranlarında ve aynı bitüm yüzdesinden üçer adet olmak üzere toplam 18 adet Marshall briket numuneleri hazırlanmıştır. Bu numunelerin havadaki, sudaki ve doymuş yüzey kuru ağırlıkları tespit edilmiştir. Elde edilen parametrelerden faydalanılarak hacim ve özgül ağırlıkları tespit edilmiştir. Pratik özgül ağırlığın birbirine göre %2 toleransı içinde olanlardan en az ikisinin ortalaması alınmış, aksi taktirde deney tekrarlanmıştır. Hazırlanan numuneler Marshall deneyine tabi tutularak stabilite (kN) ve akma (mm) parametreleri elde edilmiştir. Aynı bitüm yüzdesine sahip 3 numunenin kırılma anındaki en düşük ve en büyük stabilite değerleri arasındaki fark 120 kgf'den küçük ise üçünün ortalaması stabiliteyi, büyük ise aralarındaki fark 60 kgf'ten fazla olmayan iki değer ortalaması Marshall stabilitesi olarak alınmış, bu değerler sağlanmadığı taktirde deney yenilenmiştir. Aynı bitüm yüzdesindeki akma değerlerinin ortalaması ise akmayı vermiştir. Bitüm yüzdesine göre deneysel veriler ve ampirik bağıntılardan tespit edilen parametrelerden faydalanılarak pratik özgül ağırlık, stabilite, akma, boşluk, bitümle dolu boşluk yüzdesi grafikleri çizilmiştir.

Grafikteki eğilim çizgisinden maksimum yoğunluk ve maksimum stabilite değerlerine karşılık gelen bitüm yüzdeleri ile şartnamede belirtilen boşluk ve bitüm ile dolu boşluk ortalamalarına karşılık gelen bitüm yüzdeleri tespit edilerek bu dört değer aritmetik ortalamasından optimum bitüm yüzdesi bulunmuştur.

Tablo 7.10'da katkısız BSK aşınma tabakası Tip II dizaynı tablosu verilmiştir. Tablo 7.10'daki hesaplamalara ait örnek No 1'deki değerler Formül (7.3-7.12) denklem takımlarında hesaplanmıştır.

Şekil 7.10-15'te Bitüm oranı-D_p, stabilite, akma, V_f, VMA, V_h ilişkileri verilmiştir.

Uygulama sahasında temin edilen katkılı ve SBS katkılı BSK karışımlara ait numunelerin laboratuvar hacimsel deney sonuçları Tablo 7.17'de verilmiştir.

Tablolardaki hesaplamalarda kullanılan formül ve bağıntılar aşağıda gösterilmiştir.

$$V = W_3 - W_2 \quad (7.3)$$

$$D_p = W_1 / V \quad (7.4)$$

$$D_{port} = (D_{p1} + D_{p2} + D_{p3}) / 3 \quad (7.5)$$

$$P_A = \frac{W_B}{W_A} \times 100 \quad (7.6)$$

$$P_B = \frac{W_B}{W_A + W_B} \times 100 \quad (7.7)$$

$$G_{AG} = \frac{100}{\frac{P_k}{G_k} + \frac{P_i}{G_i} + \frac{P_f}{G_f}} \quad (7.8)$$

$$D_T = \frac{100}{\frac{100}{G_{ag}} + \frac{P_A}{G_b}} \quad (7.9)$$

$$V_h = \frac{D_T - D_{po}}{D_T} \times 100 \quad (7.10)$$

$$V_{MA} = 100 - \frac{D_p \times (100 - P_b)}{G_{ag}} \quad (7.11)$$

$$V_f = \frac{V_{MA} - V_h}{V_{MA}} \times 100 \quad (7.12)$$

Tablo 7.10’da görüldüğü üzere; laboratuvar ortamında getirilen BSK malzemeleriyle hazırlanan Marshall briketi numuneleri, önce kuru ağırlıkları daha sonra su içindeki ağırlıkları ve en son olarak suda bekletildikten sonra çıkarılıp doygun yüzey kuru ağırlıkları tespit edilerek, numunelere ait yoğunluklar elde edilen bu parametrelerden yararlanarak tespit edilmiştir.

AASHTO T166’ya göre yoğunluklar hesaplanmıştır. Numune yoğunlukları olarak aşağıdaki örnek hesaplamada, kırmataş malzemesiyle hazırlanan normal sıcak asfalt karışımın aşınma tabakası için % 4.0 bitüm oranındaki 1. numunenin sonuçları verilmiştir.

Agrega Karışımlarının Hacim Özgül Ağırlık (G) ve Karışım Yüzdeleri (P) ;

Kaba agreg için	: (G ₁) = 2,733 ; (P ₁) = % 51,0
İnce agreg için	: (G ₂) = 2,678 ; (P ₂) = % 44,0
Filler için	: (G ₃) = 2,764 ; (P ₃) = % 5,0
Bitümün özgül ağırlığı	: (G _b) = 1,022 gr/cm ³
Bitümün ağırlıkça yüzdesi	: (W _a) = % 4,0

Marshall Briketinin ;

Havadaki ağırlık (W ₁)	= 1229,6 gr.
Sudaki ağırlık (W ₂)	= 720,8 gr.
Doygun yüzey kuru ağırlık (W ₃)	= 1234,5 gr.

Hacim (V) ;

$$V = W_3 - W_2 \rightarrow 1234,5 - 720,8 = 513,7 \text{ cm}^3$$

Toplam karışımın özgül ağırlığı (D_p) ;

$$Gmb = D_p = \frac{W_1}{V} = \frac{1229,6}{513,7} = 2,394 \text{ gr/cm}^3$$

Toplam karışımın ortalama hacim özgül ağırlığı (D_{port}) ;

$$Gmb_{ort} = D_{port} = \frac{D_{p1} + D_{p2} + D_{p3}}{3} \rightarrow \frac{2,394 + 2,392 + 2,396}{3} = 2,394 \text{ gr/cm}^3$$

Toplam karışımın bitüm yüzdesi (Pb) ;

$$Pb = \frac{Pa}{100 + Pa} \times 100 \rightarrow \frac{4,0}{100 + 4,0} \times 100 = \%3,85$$

Agrega karışımının özgül ağırlığı (Gag) ;

$$Gag = \frac{100}{P_1 / G_1 + P_2 / G_2 + P_3 / G_3} \rightarrow \frac{100}{\frac{51,0}{2,733} + \frac{44,0}{2,678} + \frac{5,0}{2,764}} = 2,71 \text{ gr / cm}^3$$

Karışımın max. teorik özgül ağırlığı (Dt) ;

$$Dt = \frac{100 + Pa}{\frac{100}{Gag} + \frac{Pa}{Gb}} \rightarrow \frac{100 + 4,0}{\frac{100}{2,71} + \frac{4,0}{1,022}} = 2,548 \text{ gr / cm}^3$$

Hava boşluğu yüzdesi (Vh) ;

$$Vh = \frac{Dt - Dp_{ort}}{Dt} \times 100 \rightarrow \frac{2,548 - 2,394}{2,548} \times 100 = \%6,04$$

Agregalar arasındaki boşluk yüzdesi (V_{MA}) ;

$$V_{MA} = 100 - \frac{Dp_{ort} \times (100 - Pb)}{Gag} \rightarrow 100 - \frac{2,394 \times (100 - 3,85)}{2,710} = \%15,06$$

Asfaltla dolu boşluk yüzdesi (Vf) ;

$$Vf = \frac{V_{MA} - Vh}{V_{MA}} \times 100 \rightarrow \frac{15,06 - 6,04}{15,06} \times 100 = \%59,90$$

Tablo 7.10. Katkısız BSK aşınma tabakası tip-2 dizaynı

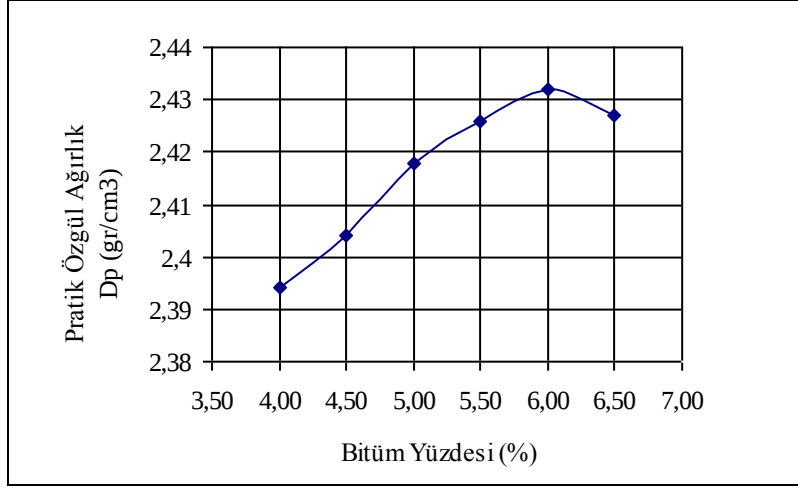
Bitüm penetrasyonu: B-55
 Bitüm özgül ağırlığı, Gb: 1,022
 Agreganın bitüm absorpsiyonu Pba: 0,29
 Agreganın efektif özgül ağırlığı, Gef: 2,732
 Agreganın hacim özgül ağırlığı, Gsb: 2,710
 Agreganın zahiri özgül ağırlığı, Gsa: 2,753

Kaba agreganın hacim özgül ağırlığı, Gk-h: 2,733
 Kaba agreganın zahiri özgül ağırlığı, Gk-z: 2,761
 İnce agreganın hacim özgül ağırlığı, Gi-h: 2,678
 İnce agreganın zahiri özgül ağırlığı, Gi-z: 2,743
 Fillerin zahiri özgül ağırlığı, Gf-z: 2,764

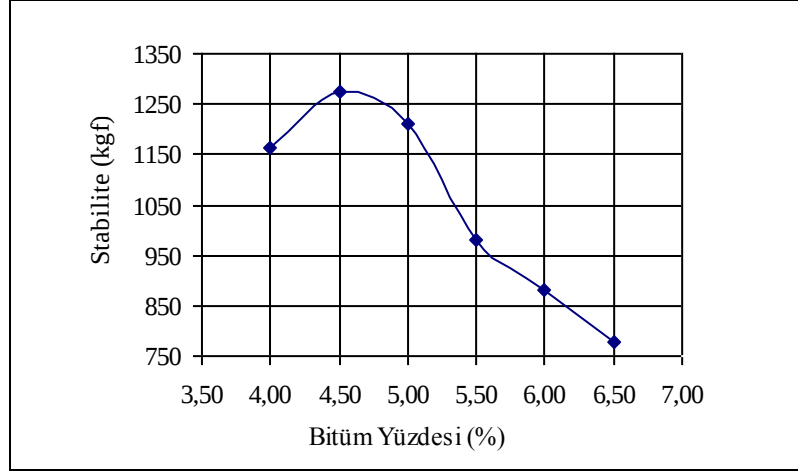
Gef-deney: 2,742
 Gef-hesap: 2,732
 Agreg ağırlığı: 1200gr
 Darbe sayısı: 75
 %Va=Agrega hacim %'si: 84,59
 %Vb=Bitüm hacim %'si: 11,19
 %Vh=Hava hacim %'si: 3,94

Kaba %'si = 51,0
 İnce %'si = 44,0
 Filler %'si = 5,0

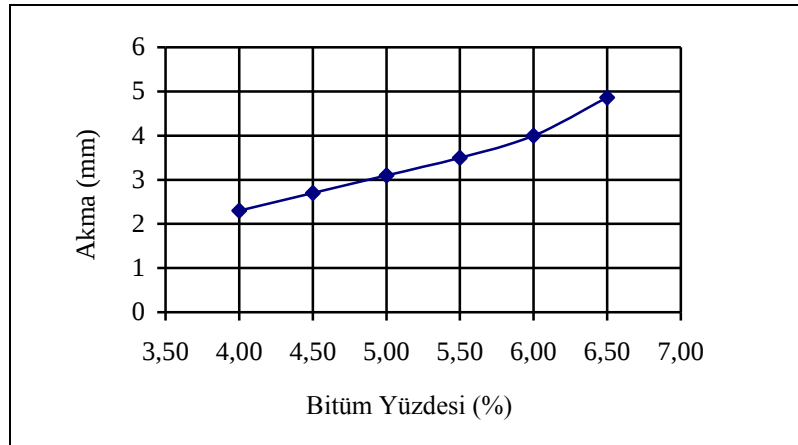
No	Bitüm		Sıcaklık oC	Yükseklikler, mm				Havada Ağırlık,g	Sudaki Ağırlık,g	Doy.Yüz. Ağırlık,g	Hacim cm3	Hacim Özg. ağır.	Max.teo. Özg.Ağ.	Boşluk Vh	Ag. A.Boş. V.M.A	Asf.Dol. Boş. Vf	Akma	Stab.	Düz. Fak.	Düz. Stab.
	Wa,%	g		1	2	3	Ort.	A	C	B	V	Dp	Dt	%	%	%	Mm	Kgf		Kgf
1	4,00	48,0	135	62,3	62,1	62,3	62,2	1229,6	720,8	1234,5	513,7	2,394					2,35	1123	1,052	1181
2	4,00	48,0	135	61,8	61,9	61,9	61,9	1232,4	722,1	1237,4	515,30	2,392					2,56	1086	1,062	1153
3	4,00	48,0	135	62,1	61,8	62,1	62,0	1233,5	722,4	1237,2	514,80	2,396					2,12	1094	1,058	1158
												2,394	2,548	6,04	15,06	59,90	2,34			1164
4	4,50	54,0	135	62,8	62,6	62,7	62,7	1246,2	733,5	1250,4	516,9	2,411					2,39	1253	1,039	1302
5	4,50	54,0	135	62,4	62,2	62,5	62,4	1243,6	732,4	1249,6	517,2	2,404					2,69	1158	1,048	1214
6	4,50	54,0	135	61,8	61,9	62,0	61,9	1245,5	728,3	1248,3	520	2,395					3,05	1234	1,061	1309
												2,404	2,530	4,98	15,13	67,08	2,71			1275
7	5,00	60,0	135	62,5	62,5	62,1	62,4	1249,3	734,4	1252,3	517,9	2,412					3,08	1105	1,048	1158
8	5,00	60,0	135	61,9	62,2	62,5	62,2	1249,4	734,4	1251,3	516,9	2,417					2,99	1164	1,053	1226
9	5,00	60,0	135	62,2	62,5	62,5	62,4	1250,2	735,6	1251,1	515,5	2,425					3,23	1189	1,047	1245
												2,418	2,512	3,73	15,02	75,18	3,10			1210
10	5,50	66,0	135	63,2	62,6	63,0	62,9	1255,5	739,4	1257,2	517,8	2,425					3,45	955	1,033	987
11	5,50	66,0	135	63,4	63,1	63,2	63,2	1256,4	739,5	1258,8	519,3	2,419					3,78	923	1,025	946
12	5,50	66,0	135	63,5	63,2	63,2	63,3	1256,3	742,5	1258,8	516,3	2,433					3,28	989	1,023	1012
												2,426	2,495	2,76	15,15	81,82	3,50			982
13	6,00	72,0	135	63,9	63,6	63,9	63,8	1261,4	742,2	1263,1	520,9	2,422					3,87	895	1,010	904
14	6,00	72,0	135	63,5	63,7	63,7	63,6	1260,5	744,5	1262,1	517,6	2,435					3,90	832	1,015	844
15	6,00	72,0	135	63,4	63,7	63,7	63,6	1259,8	745,6	1262,3	516,7	2,438					4,34	880	1,016	894
												2,432	2,478	1,86	15,35	87,91	4,04			881
16	6,50	78,0	135	64,1	64,5	64,3	64,3	1269,4	746,4	1270,6	524,2	2,422					4,67	799	0,997	797
17	6,50	78,0	135	63,9	64,1	64,2	64,1	1267,8	748,8	1269,2	520,4	2,436					4,91	767	1,003	770
18	6,50	78,0	135	63,9	64,1	64,1	64,0	1270,1	747,9	1272,1	524,2	2,423					4,99	764	1,004	767
												2,427	2,462	1,39	15,91	91,26	4,86			778
	4,95	Optimum bitüm sonuçları (Hesapla Geff)										2,415	2,514	3,94	15,10	73,93	3,03			1222
		Aşınma tabakası dizayn kriterleri												(3-5)	min14	(65-75)	(2-4)			min900



Şekil 7.10. Katkısız asfalt betonu aşınma tabakası pratik özgül ağırlık ve bitüm oranı ilişkisi



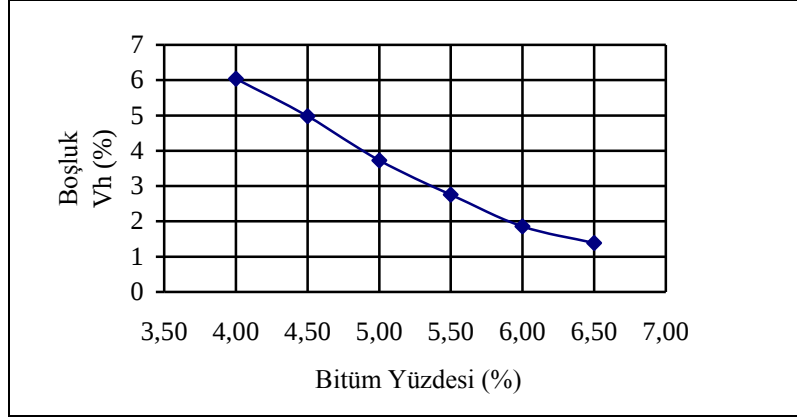
Şekil 7.11. Katkısız asfalt betonu aşınma tabakası stabilite ve bitüm oranı ilişkisi



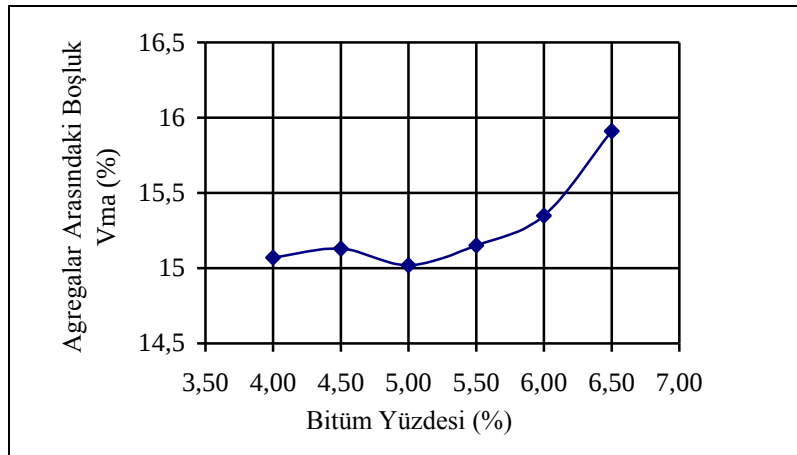
Şekil 7.12. Katkısız asfalt betonu aşınma tabakası akma ve bitüm oranı ilişkisi



Şekil 7.13. Katkısız asfalt betonu aşınma tabakası asfaltla dolu boşluk ve bitüm oranı ilişkisi



Şekil 7.14. Katkısız asfalt betonu aşınma tabakası boşluk ve bitüm oranı ilişkisi



Şekil 7.15. Katkısız asfalt betonu aşınma tabakası agregalar arası boşluk ve bitüm oranı ilişkisi

Grafiklerdeki verileri ile Formül 7.13'ten optimum bitüm yüzdesi tespit edilmiştir.

$$(Opt.a/c) = [MaxDp(a/c)+MaxS(a/c)+\%4Vh(a/c)+\%70Vf(a/c)] / 4 \quad (7.13)$$

Karışım gradasyonu esas alınarak TS-3720'ye göre yapılan asfalt betonu aşınma tabakası dizaynında optimum bitüm oranı $\%4,95 \pm 0,3$ olarak bulunmuştur. Şekil 7.10, Şekil 7.11, Şekil 7.14 ve Şekil 7.15 kullanılarak elde değerlerden faydalanılarak optimum bitüm içeriği aşağıda gösterildiği gibi belirlenmiştir.

$$(Opt.a/c) = (6,21 + 4,10 + 4,87 + 4,64) / 4 = \%4,95$$

Katkısız asfalt betonu aşınma tabakası tip II dizayn kriterlerine ait deney sonuçlarından elde edilen karışım değerleri ve şartname limiti karşılaştırılması Tablo 7.11'de verilmiştir.

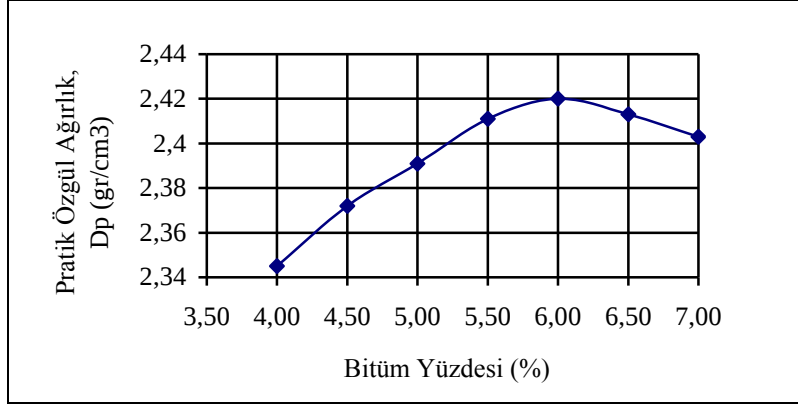
Tablo 7.11. Katkısız asfalt betonu aşınma tabakası dizayn kriterleri sonuçları

Marshall Briket Deneyleri	Karışım Değerleri	Şartname Değerleri
%'e optimum bitüm	4,95	$\pm \%0,3$
Marshall stabilite değeri (kgf)	1222	Min.900
Akma (mm)	3,03	2-4
% Agregalar arası boşluk (VMA)	15,10	Min. 14
% Asfaltla dolu boşluk (Vf)	73,93	65-75
% Hava boşluğu (Vh)	3,94	3-5

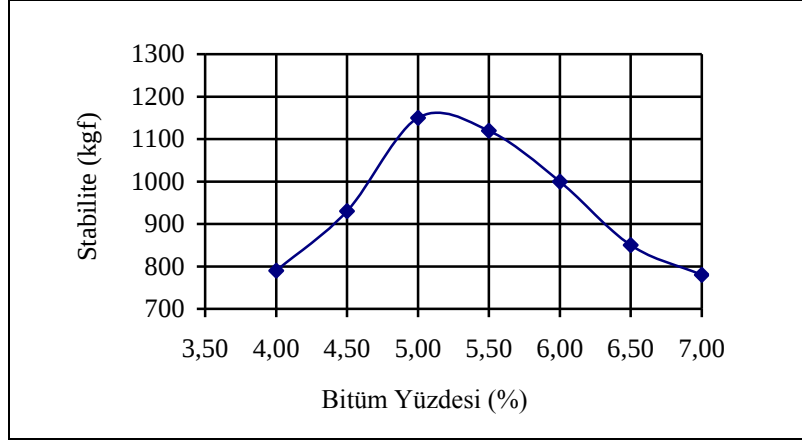
Tablo 7.11'de tespit edilen katkısız asfalt betonu aşınma tabakası tip II karışım dizayn değerlerinin şartname koşullarını sağladığı görülmüştür.

SBS katkılı BSK için aynı şekilde aşınma tabakası tip II dizayn uygulaması gerçekleştirilmiştir. Karışım gradasyonu olarak Tablo 7.2'deki agrega gradasyonu esas alınarak TS-3720'ye göre yapılan asfalt betonu aşınma tabakası dizaynında optimum bitüm oranı $\%5,24 \pm 0,3$ olarak bulunmuştur.

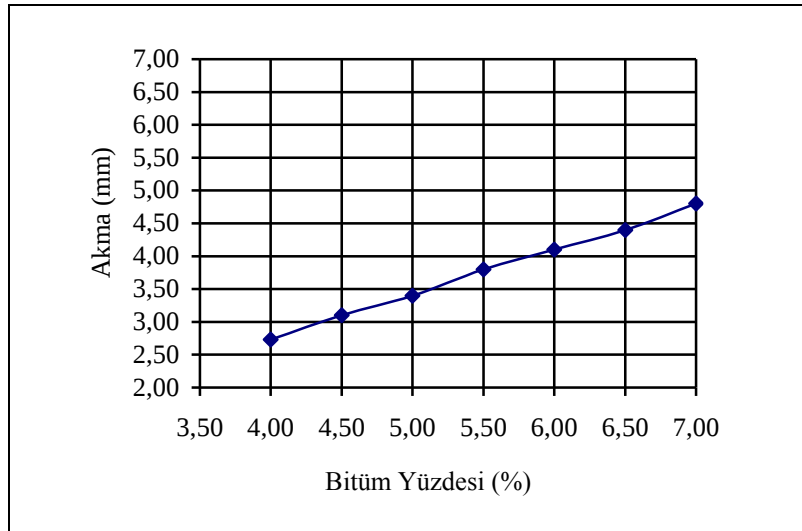
Şekil 7.16-7.21'de Bitüm oranı- Dp, stabilite, akma, Vf, VMA, Vh ilişkileri verilmiştir.



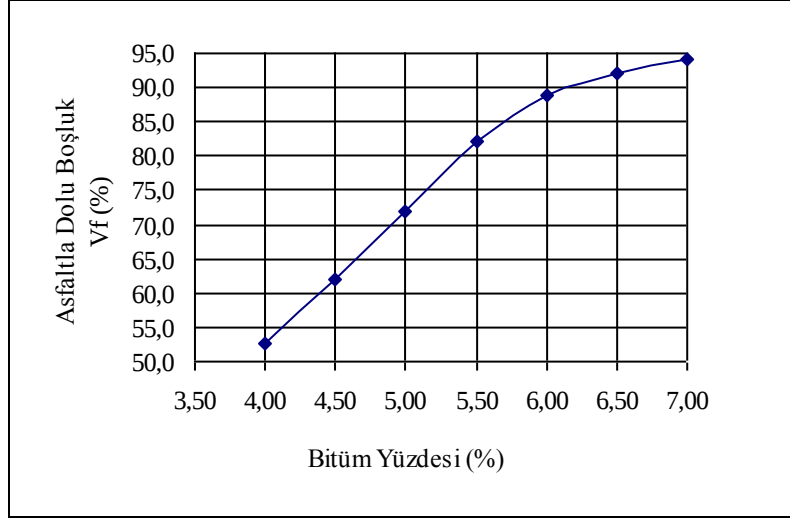
Şekil 7.16. Modifiye asfalt betonu aşınma tabakası pratik özgül ağırlık ve bitüm oranı ilişkisi



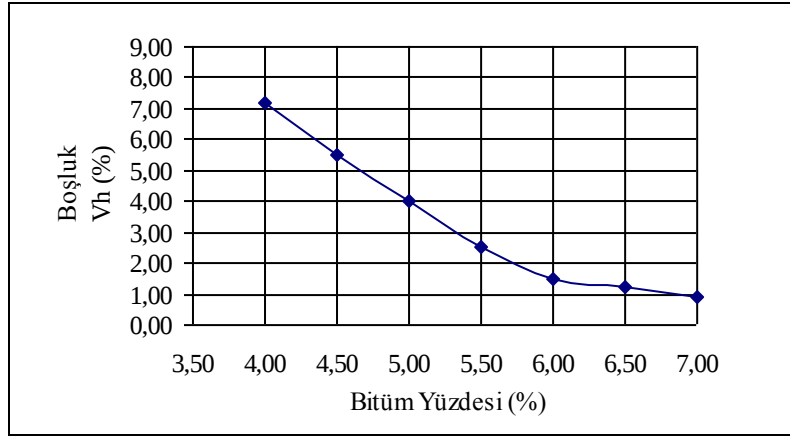
Şekil 7.17. Modifiye asfalt betonu aşınma tabakası stabilite ve bitüm oranı ilişkisi



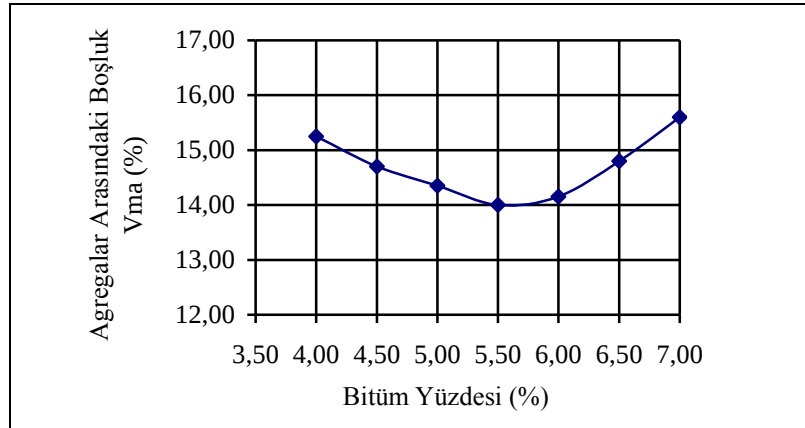
Şekil 7.18. Modifiye asfalt betonu aşınma tabakası akma ve bitüm oranı ilişkisi



Şekil 7.19. Modifiye asfalt betonu aşınma tabakası asfaltla dolu boşluk ve bitüm oranı ilişkisi



Şekil 7.20. Modifiye asfalt betonu aşınma tabakası boşluk ve bitüm oranı ilişkisi



Şekil 7.21. Modifiye asfalt betonu aşınma tabakası agregalar arası boşluk ve bitüm oranı ilişkisi

Modifiye asfalt betonu aşınma tabakası tip II dizayn kriterlerine ait deney sonuçlarından elde edilen karışım değerleri ve şartname limiti karşılaştırılması Tablo 7.12’de verilmiş ve dizayn değerlerinin şartname koşullarını sağladığı görülmüştür.

Tablo 7.12. Modifiye asfalt betonu aşınma tabakası dizayn kriterleri sonuçları

Marshall Briket Deneyleri	Karışım Değerleri	Şartname Değerleri
Darbe sayısı	75	-
Pratik yoğunluk	2,411 gr/cm ³	-
%’e optimum bitüm	5,24	± %0,3
Marshall stabilite değeri (kg)	1170	Min.900
Akma (mm)	3,58	2-4
% Agregalar arası boşluk (VMA)	13,9	Min. 14
% Asfaltla dolu boşluk (Vf)	75,4	65-75
% Hava boşluğu (Vh)	3,1	3-5

Tablo 7.13’te katkısız BSK binder tabakası dizaynı tablosu verilmiştir.

Tablo 7.13. Katkısız BSK binder tabakası dizaynı

Bitüm penetrasyonu: B-55
 Bitüm özgül ağırlığı, Gb: 1,022
 Agreganın bitüm absorpsiyonu Pba: 0,28
 Agreganın efektif özgül ağırlığı, Gef: 2,735
 Agreganın hacim özgül ağırlığı, Gsb: 2,715
 Agreganın zahiri özgül ağırlığı, Gsa: 2,755

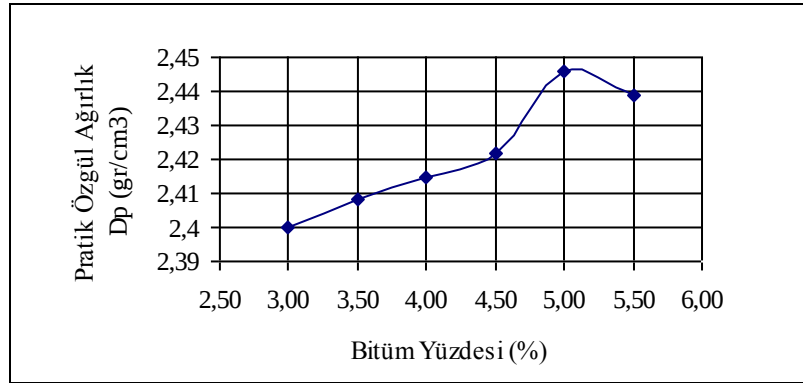
Kaba agreganın hacim özgül ağırlığı, Gk-h: 2,733
 Kaba agreganın zahiri özgül ağırlığı, Gk-z: 2,761
 İnce agreganın hacim özgül ağırlığı, Gi-h: 2,678
 İnce agreganın zahiri özgül ağırlığı, Gi-z: 2,743
 Fillerin zahiri özgül ağırlığı, Gf-z: 2,764

Gef-deney: 2,739
 Gef-hesap: 2,735
 Agreg ağırlığı: 1200gr
 Darbe sayısı: 75
 %Va=Agrega hacim %'si: 84,93
 %Vb=Bitüm hacim %'si: 10,23
 %Vh=Hava hacim %'si: 4,85

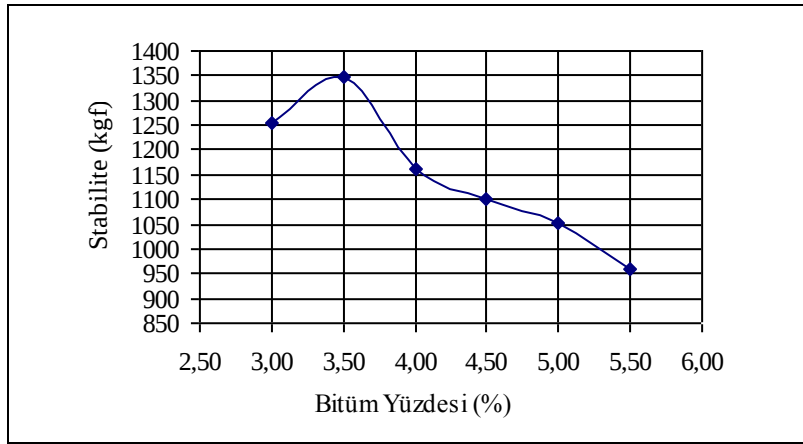
Kaba %'si = 58,8
 İnce %'si = 35,9
 Filler %'si = 5,3

No	Bitüm		Sıcaklık oC	Yükseklikler, mm				Havada	Sudaki	Doy.Yüz.	Hacim	Hacim	Max.teo.	Boşluk	V.M.A	Asf.Dol.	Akma	Stab.	Düz.	Düz.
	Wa,%	g		1	2	3	Ort.	Ağırlık,g	Ağırlık,g	Ağırlık,g	cm3	Özg.ağır.	Özg.Ağ.	Vh		Boş.	Mm	Kg	Fak.	Stab.
1	3,00	36,0	135	62,6	62,7	62,8	62,7	1215,8	715,2	1220,4	505,2	2,407					2,25	1208	1,020	1231
2	3,00	36,0	135	63,7	63,7	63,7	63,7	1229,1	723,4	1236,1	512,7	2,397					2,29	1299	0,994	1292
3	3,00	36,0	135	62,2	62,3	62,4	62,3	1199,0	705,3	1205,4	500,1	2,397					2,00	1208	1,030	1245
												2,400	2,590	7,33	14,17	48,27	2,18			1256
4	3,50	42,0	135	63,7	63,7	63,9	63,8	1224,6	720,0	1228,5	508,5	2,408					2,33	1345	0,933	1335
5	3,50	42,0	135	64,0	64,4	64,2	64,2	1229,3	724,4	1232,9	508,5	2,418					2,39	1391	0,982	1367
6	3,50	42,0	135	63,5	63,7	63,6	63,6	1229,2	721,1	1233,4	512,3	2,399					2,98	1345	0,997	1341
												2,408	2,571	6,34	14,31	55,69	2,57			1348
7	4,00	48,0	135	63,3	63,5	63,3	63,4	1228,5	720,2	1230,1	509,9	2,409					2,95	1208	1,002	1211
8	4,00	48,0	135	63,9	64,0	64,0	64,0	1155,5	680,1	1156,9	476,8	2,423					2,69	1116	0,988	1102
9	4,00	48,0	135	63,0	63,0	63,1	63,0	1228,6	721,1	1230,5	509,4	2,412					3,04	1162	1,011	1174
												2,415	2,552	5,37	14,47	62,89	2,89			1162
10	4,50	54,0	135	62,8	63,2	63,2	63,1	1228,7	724,2	1229,6	505,4	2,431					3,02	1116	1,010	1127
11	4,50	54,0	135	63,3	63,3	63,4	63,3	1235,4	726,5	1236,7	510,2	2,421					3,50	1024	1,003	1027
12	4,50	54,0	135	63,1	63,1	63,2	63,1	1230,1	721,5	1231,1	509,6	2,414					2,90	1139	1,008	1148
												2,422	2,534	4,42	14,45	69,41	3,14			1101
13	5,00	60,0	135	62,6	62,6	62,6	62,6	1241,6	735,4	1242,1	506,7	2,450					3,42	1001	1,022	1024
14	5,00	60,0	135	62,2	62,2	62,4	62,3	1240,7	731,4	1240,9	509,5	2,435					3,26	978	1,031	1009
15	5,00	60,0	135	62,9	63,1	63,0	63,0	1232,7	731,1	1233,6	502,5	2,453					3,44	1116	1,012	1129
												2,446	2,516	2,78	14,20	80,42	3,37			1054
16	5,50	66,0	135	61,5	61,8	61,5	61,6	1226,7	725,1	1226,9	501,8	2,444					3,62	978	1,050	1028
17	5,50	66,0	135	62,5	62,5	62,5	62,5	1233,5	729,3	1233,7	504,4	2,445					3,78	887	1,025	909
18	5,50	66,0	135	63,1	62,9	63,2	63,1	1253,1	737,3	1253,4	516,1	2,428					4,06	932	1,010	942
												2,439	2,499	2,40	14,85	83,84	3,82			959
	4,50	Optimum bitüm sonuçları (Hesapla Gef)										2,427	2,551	4,85	14,4	66,5	3,04	1,17	366	1111,9
		Binder dizayn kriterleri												(4-6)	min13	(60-75)	(2-4)	max1.4		min750

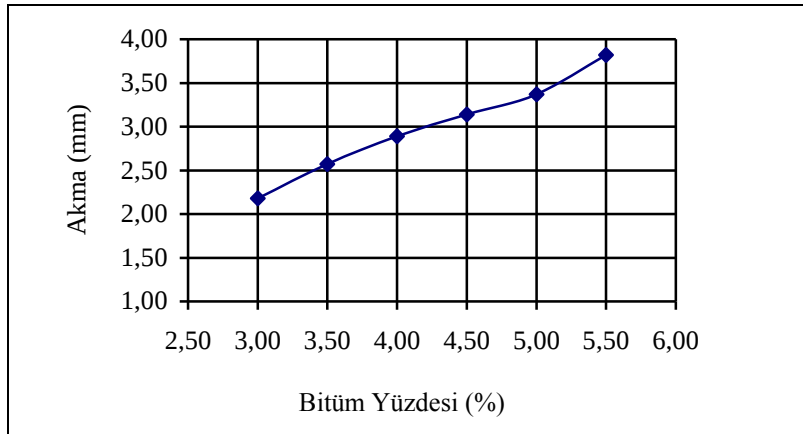
Şekil 7.22-7.27’de Bitüm oranı- D_p , stabilite, akma, V_f , VMA, V_h ilişkileri verilmiştir.



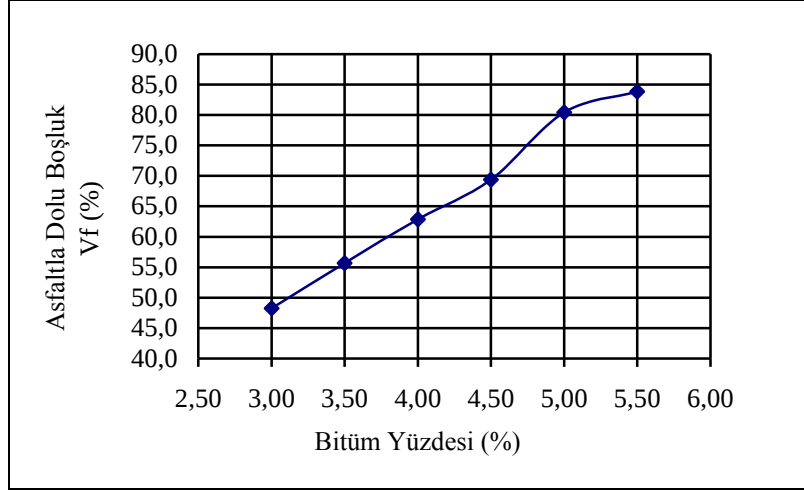
Şekil 7.22. Katkısız asfalt betonu binder tabakası pratik özgül ağırlık ve bitüm oranı ilişkisi



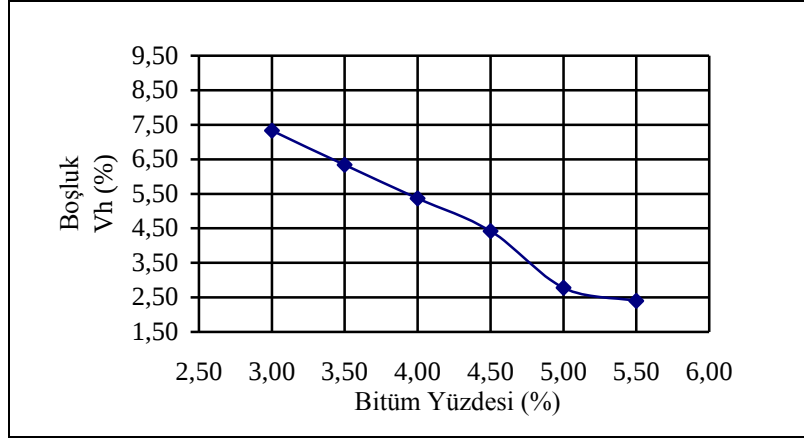
Şekil 7.23. Katkısız asfalt betonu binder tabakası stabilite ve bitüm oranı ilişkisi



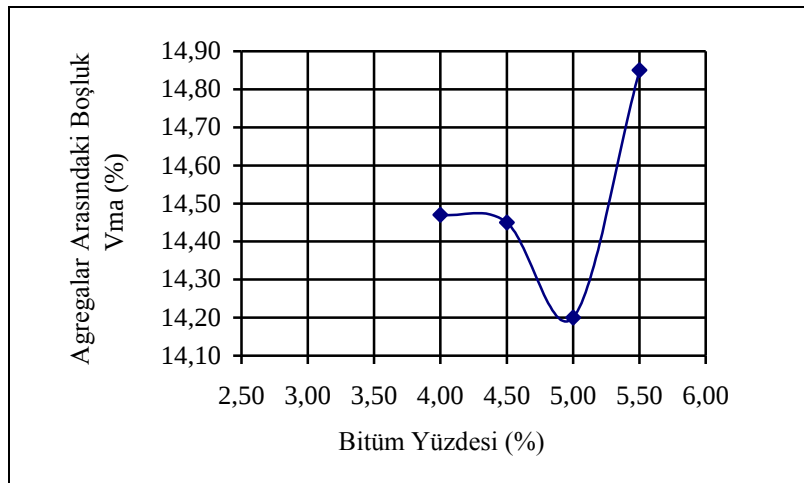
Şekil 7.24. Katkısız asfalt betonu binder tabakası akma ve bitüm oranı ilişkisi



Şekil 7.25. Katkısız asfalt betonu binder tabakası asfaltla dolu boşluk ve bitüm oranı ilişkisi



Şekil 7.26. Katkısız asfalt betonu binder tabakası boşluk ve bitüm oranı ilişkisi



Şekil 7.27. Katkısız asfalt betonu binder tabakası agregalar arası boşluk ve bitüm oranı ilişkisi

Katkısız BSK için aynı şekilde binder tabakası dizayn uygulaması gerçekleştirilmiştir. Karışım gradasyonu esas alınarak TS-3720'ye göre yapılan asfalt betonu binder tabakası dizaynında optimum bitüm oranı $\%4,50 \pm \%0,3$ olarak bulunmuştur.

Katkısız asfalt betonu binder tabakası dizayn kriterlerine ait deney sonuçlarından elde edilen karışım değerleri ve şartname limiti karşılaştırılması Tablo 7.14'te verilmiştir.

Tablo 7.14. Katkısız asfalt betonu binder tabakası dizayn kriterleri

Marshall Briket Deneyleri	Karışım Değerleri	Şartname Değerleri
%'e optimum bitüm	4,50	$\pm \%0,3$
Marshall stabilite değeri (kg)	1112	Min.750
Akma (mm)	3,04	2-4
% Agregalar arası boşluk (VMA)	14,44	Min. 13
% Asfaltla dolu boşluk (Vf)	66,46	60-75
% Hava boşluğu (Vh)	4,85	4-6

Tablo 7.14'te tespit edilen katkısız asfalt betonu binder tabakası karışım dizayn değerlerinin şartname koşullarını sağladığı görülmüştür.

7.2.2. Arazi Çalışmaları

Çalışma kapsamında ilk olarak deneysel çalışmaların yürütüleceği yol uygulama sahası belirlenmiştir. Saha olarak İstanbul İli Küçükçekmece İlçesi Yarımburgaz Mahallesi Burcu Sokak'ta yer alan tali yol uygulama yolu olarak kullanılmıştır.

Yol yapım çalışmalarında ilk olarak granüler temel tabakası uygulandıktan sonra yolun Şekil 7.28'de gösterilen astar tabakası uygulamasına geçilmiştir.



Şekil 7.28. BSK astar uygulaması

Granüler temel tabakası uygulamasından sonra katkısız BSK aşınma tabakası olarak finişerlerle yola serilip sıkıştırılmıştır.

Şekil 7.29’da BSK’nın finişerle serim ve silindirle sıkıştırma uygulaması gösterilmiştir.



Şekil 7.29. Normal BSK uygulaması

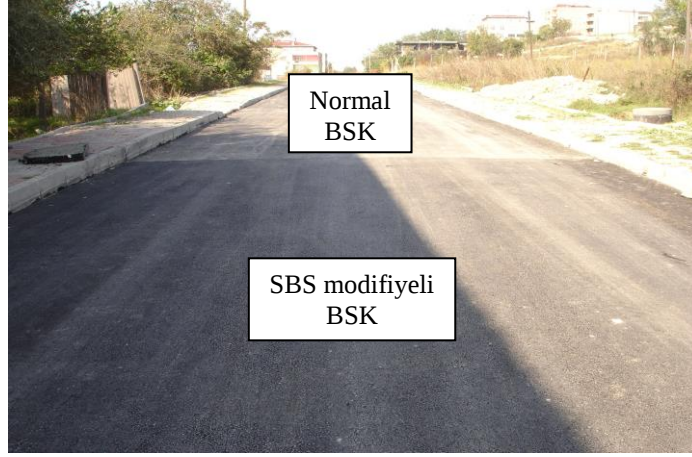
Normal BSK uygulamasının bittiği noktadan itibaren granüler temel tabakası üzerine aşınma tabakası olarak SBS modifiyeli BSK uygulaması yapılmıştır.

SBS modifiyeli BSK karışımının finişerle serimi ve silindirle sıkıştırılması uygulaması Şekil 7.30’da verilmiştir.



Şekil 7.30. SBS modifiyeli BSK uygulaması

Güzergah olarak çalışmalar, Şekil 7.31’deki yaklaşık 50m. uzunluk, 7m. genişlikteki bir tali yol üst yapı alanında sürdürülmüştür.



Şekil 7.31. Normal ve SBS katkılı esnek yol kaplaması yapımı

7.2.2.1 Arazi Ölçüm Cihazı Uygulaması

Yol güzergahını kullanan taşıtların ve yolun sıcaklık özelliklerini tespit etmek için iki adet trafik analiz ölçüm cihazı yolun gidiş geliş istikametinde taşıtları ortalayacak şekilde ölçüm yapılmak üzere yerleştirilmiştir. Trafik analiz ölçüm cihazıyla 15'er günlük periyotlar zarfında 12 aylık zaman diliminde ölçümler yapılmıştır.

Şekil 7.32'deki trafik analiz ölçüm cihazının montajı yapılarak ölçümler gerçekleştirilmiştir.



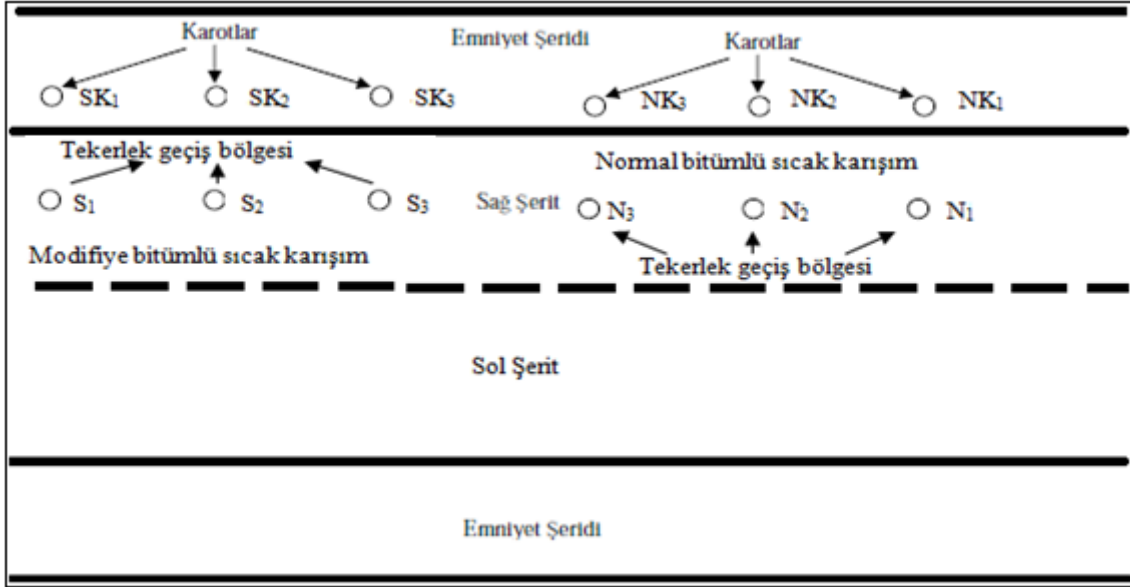
Şekil 7.32. Trafik analiz ölçüm cihazı montajı

7.2.2.2. Aşınma Tabakası Karot Numunelerinin Alınması

Yolun SBS katkılı ve katkısız kısımlarında, bordüre yakın olan kenar kısmı ile taşıt tekerleklerin geçiş güzergahı olan eksen kısmında; 1., 4., 8. ve 12. aylarda belli aralıklarla gidiş geliş istikametinde aynı doğrultuda karot numuneleri belli aralıklarda 9'ar adet olmak

üzere toplam olarak 36 adet numune alınarak laboratuvar deneylerine tabi tutulmak üzere muhafaza altına alınmıştır.

Aşınma tabakasından karot numuneleri, Şekil 7.33'teki gibi isimlendirilerek alınmıştır.



Şekil 7.33. Aşınma tabakası karot alımı (ölçeksiz plan)

Yolun boyuna eğiminin, yatay ve düşey kurb ile kavşakların dolaylı etkilerinin olabileceği düşünülerek, numunelerin eğimsiz ve düz (alıynman) yol kesimlerinden alınmasına dikkat edilmiştir.

Şekil 7.34'teki karot cihazıyla karot numunelerinin alımı gerçekleştirilmiştir.



Şekil 7.34. Karot numunelerinin elde edilmesi

Trafik ve çalışma güvenliğini sağlamak amacıyla çalışmalarda esnek yol kaplamasında trafik işaretlemesi kullanılarak şeritler dönüşümlü olarak trafiğe kapatılmış ve numune alımlarında, Şekil 7.35'teki gibi trafiğin yoğun olmadığı zamanlar dikkate alınmıştır.



Şekil 7.35. Yol kenar güzergahı boyunca alınan karotlar

Şekil 7.36'daki ölçülerde temin edilen karot numuneleri daha sonra laboratuvar deneylerinde kullanıma hazır hale gelmesi için karot kesme cihazında 63,5mm standart yükseklik boyutlarına getirilmiştir.



Şekil 7.36. Elde edilen karot numune boyutları

Yol güzergahı boyunca bir yıllık süre zarfında belli periyottaki zaman dilimlerinde alınan karot numunesinin yerlerini doldurmak amacıyla, Şekil 7.37'de gösterilen İsfalt plent şantiyesinden temin edilen hazır soğuk asfalt karışım kullanılmıştır.



Şekil 7.37. İsfalt plant şantiyesi ve soğuk hazır asfalt stokları

Ümraniye İsfalt plant şantiyesinden temin edilen orta hızda kuruyan MC 30 astar ve hazır soğuk asfalt malzemeleri numune alınan yerlere Şekil 7.38’de gösterildiği şekilde yerleştirilerek sıkıştırılmıştır.



Şekil 7.38. Hazır soğuk asfalt karışımla karot boşluklarının doldurulması

7.2.2.3. Nükleer Yoğunluk Ölçer Cihazıyla Sıkıştırma Yüzdesi Tayini

Yol güzergahında taşıt tekerleklerini geçtiği istikamette, katkılı ve katkısız asfalt betonu aşınma tabakasında belli aralıklarla 1., 4., 8. ve 12. ay periyotlarında sıkıştırma yüzdesi tayininde, nükleer metot deney cihazı kullanılmıştır. Sıkıştırma yüzdesi verileri belli periyotlarda ölçülerek modifiyeli ve normal BSK’lardaki trafik ve çevre etkilerine bağlı aşınma tabakalarındaki değişimler tespit edilmiştir.

Sıkıştırma yüzdesi tayininde Şekil 7.39’daki Troxler nükleer yoğunluk ölçer cihazıyla ölçümler yapılmıştır.



Şekil 7.39. Nükleer yoğunluk ölçer cihazı

Arazide sıkıştırma yüzdesi tayini yapılırken Troxler yoğunluk ölçme cihazı kullanılarak belli periyotlarda bir yıllık süre zarfındaki karot numunelerin alındığı bölgelerde ölçümler yapılmıştır. Deneyisel çalışmada ASTM D2922 ve D3017 standardı uygulanmıştır.

Arazi sıkıştırma yüzdesi verileri Tablo 7.15-Tablo 7.18’de verilmiştir.

Tablo 7.15. Arazideki sıkıştırma tayininde 1. ay Troxler cihazı ölçüm değerleri

Numune tipi		Katkısız		SBS katkılı	
Numune konumu		Sağ dış	Sağ iç	Sağ dış	Sağ iç
Uygulama alanı		Kenar	Tekerlek geçiş bölgesi	Kenar	Tekerlek geçiş bölgesi
Pratik özgül ağırlık (gr/cm ³)		2,4	2,4	2,4	2,4
Asfalt yüzey sıcaklığı		12°C	12°C	12°C	12°C
Sıkışma derecesi		sıkışma (%)	sıkışma (%)	sıkışma(%)	sıkışma (%)
Numune no	1	81,1	81,5	87,6	87,6
	2	78,9	78,9	89,5	89,7
	3	80,6	80,7	89,6	89,9
	4	85,5	85,9	87,1	87,3
	5	81,1	81,1	83,6	83,8
	6	79,1	79,3	85,6	85,5
	7	76,5	76,6	73,6	73,7
	8	80,6	80,6	81	81
	9	87,5	87,7	87,8	87,8
Ortalama ölçüm değerleri		81,21	81,37	85,04	85,14

Tablo 7.15’de ölçümün ilk olarak yapıldığı 1. ay verilerinde; asfalt yüzey sıcaklığı 12°C, sıkıştırma yüzdeleri ortalamaları ise normal BSK kaplamalarda yol kenar noktaları

için %81,21, tekerlek geçiş bölgeleri için %81,37 ve modifiye BSK kaplamalarda ise yol kenarı için %85,04, tekerlek geçiş bölgeleri için ise %85,14 olarak ölçülmüştür.

Tablo 7.16. Arazideki sıkıştırma tayininde 4. ay Troxler cihazı ölçüm değerleri

Numune tipi		Katkısız		SBS katkılı	
Numune konumu		Sağ dış	Sağ iç	Sağ dış	Sağ iç
Uygulama alanı		Kenar	Tekerlek geçiş bölgesi	Kenar	Tekerlek geçiş bölgesi
Pratik özgül ağırlık (gr/cm ³)		2,4	2,4	2,4	2,4
Asfalt yüzey sıcaklığı		36,0°C	36,0°C	35,5°C	35,5°C
Sıkışma derecesi		sıkışma (%)	sıkışma (%)	sıkışma(%)	sıkışma (%)
Numune no	1	82	95,7	89,3	96,2
	2	81,1	96,2	93,7	97
	3	81,9	93,5	92,3	95,6
	4	88,7	94,1	89,6	94,3
	5	83,7	95,6	86,3	96,2
	6	84,6	96,0	89,2	96,7
	7	79,1	93,2	85,8	94,1
	8	85,2	95,1	92,1	95,6
	9	88,5	93,5	91,2	95,1
Ortalama ölçüm değerleri		83,87	94,77	89,94	95,64

Tablo 7.16'daki 4. ay verilerinde; asfalt yüzey sıcaklığı 36°C, sıkıştırma yüzdeleri ortalamaları ise normal BSK kaplamalarda yol kenar noktaları için %83,87, tekerlek geçiş bölgeleri için %94,77 ve modifiye BSK kaplamalarda ise yol kenarı için %89,94, tekerlek geçiş bölgeleri için ise %95,64 olarak ölçülmüştür.

Tablo 7.17. Arazideki sıkıştırma tayininde 8. ay Troxler cihazı ölçüm değerleri

Numune tipi		Katkısız		SBS katkılı	
Numune konumu		Sağ dış	Sağ iç	Sağ dış	Sağ iç
Uygulama alanı		Kenar	Tekerlek geçiş bölgesi	Kenar	Tekerlek geçiş bölgesi
Pratik özgül ağırlık (gr/cm ³)		2,4	2,4	2,4	2,4
Asfalt yüzey sıcaklığı		42°C	42 °C	42°C	42°C
Sıkışma derecesi		sıkışma (%)	sıkışma (%)	sıkışma(%)	sıkışma (%)
Numune no	1	86	98,2	92,5	99,1
	2	89,2	97,3	95,3	98,2
	3	88,4	97,2	93,2	98,1
	4	90,5	98,5	92,1	99,6
	5	89,2	97,7	90,3	98,8
	6	87,5	97,3	92,5	99,4
	7	88,4	95,1	90,6	97,5
	8	89,1	97,3	94,2	97,8
	9	91,1	96,5	93,7	98,3
Ortalama ölçüm değerleri		88,82	97,23	92,71	98,53

Tablo 7.17'deki 8. ay verilerinde; asfalt yüzey sıcaklığı 42°C, sıkıştırma yüzdeleri ortalamaları ise normal BSK kaplamalarda yol kenar noktaları için %88,82, tekerlek geçiş bölgeleri için %97,23 ve modifiye BSK kaplamalarda ise yol kenarı için %92,71, tekerlek geçiş bölgeleri için ise %98,53 olarak ölçülmüştür.

Tablo 7.18. Araziideki sıkıştırma tayininde 12. ay Troxler cihazı ölçüm değerleri

Numune tipi		Katkısız		SBS katkılı	
Numune konumu		Sağ dış	Sağ iç	Sağ dış	Sağ iç
Uygulama alanı		Kenar	Tekerlek geçiş bölgesi	Kenar	Tekerlek geçiş bölgesi
Pratik özgül ağırlık (gr/cm ³)		2,4	2,4	2,4	2,4
Asfalt yüzey sıcaklığı		8°C	8°C	7,5°C	7,5°C
Sıkışma derecesi		sıkışma (%)	sıkışma (%)	sıkışma (%)	sıkışma (%)
Numune no	1	95,2	100,0	96,8	100,0
	2	93,3	100,0	97,2	100,0
	3	94,2	100,0	95,1	100,0
	4	93,5	100,0	94,2	100,0
	5	94,2	100,0	95,1	100,0
	6	92,5	100,0	95,6	100,0
	7	93	100,0	93,2	100,0
	8	92,1	100,0	94,2	100,0
	9	93,1	100,0	93,7	100,0
Ortalama ölçüm değerleri		93,46	100,0	95,01	100,0

Tablo 7.18'deki 12. ay verilerinde; asfalt yüzey sıcaklığı 8°C, sıkıştırma yüzdeleri ortalamaları ise normal BSK kaplamalarda yol kenar noktaları için %93,46, tekerlek geçiş bölgeleri için %100 ve modifiye BSK kaplamalarda ise yol kenarı için %95,01, tekerlek geçiş bölgeleri için ise %100 olarak ölçülmüştür.

BSK karışımların zamana bağlı sıkıştırma dereceleri Tablo 7.19'da karşılaştırılmıştır.

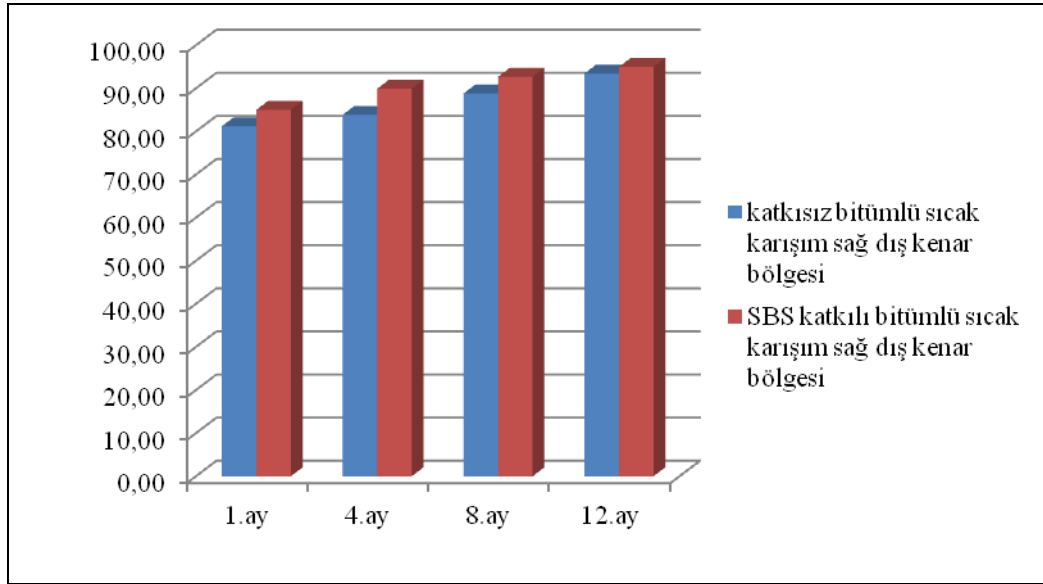
Tablo 7.19. BSK'larda zamana bağlı sıkıştırma dereceleri

BSK tipi	katkısız		SBS katkılı	
BSK ölçüm konumu	sağ dış	sağ iç	sağ dış	sağ iç
BSK'larda ölçüm yapılacak yol durumu	kenar	tekerlek geçiş bölgesi	kenar	tekerlek geçiş bölgesi
Ölçüm periyotları	Sıkıştırma dereceleri ortalamaları (%)			
1. ay	81,21	81,37	85,04	85,14
4. ay	83,87	94,77	89,94	95,64
8. ay	88,82	97,23	92,71	98,53
12. ay	93,46	100,0	95,01	100,0

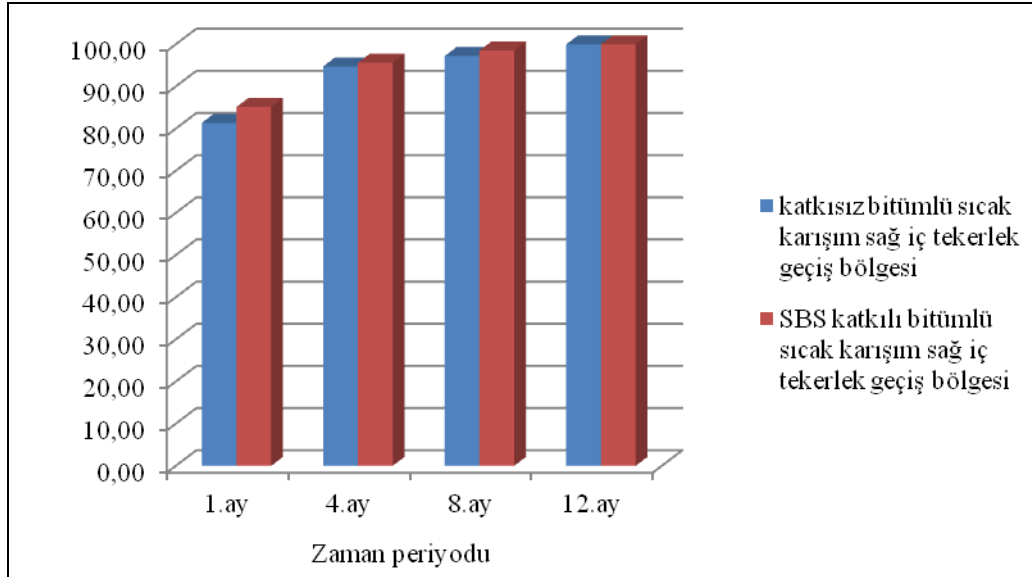
Tablo 7.19'da zamana bağlı sıkıştırma derecelerine bakıldığında 12 aylık süre zarfında normal BSK'da yol kenarlarındaki sıkıştırma derecelerinde ortalama %15,08'lik bir artış, taşıt tekerleği geçiş bölgesinde ise ortalama %22,9'luk bir artış görülmüştür. SBS katkılı

BSK'larda ise yol kenarlarında ortalama %11,8, taşıt tekerlek geçiş bölgelerinde ise ortalama %17,45'lik bir artış tespit edilmiştir.

Şekil 7.40-Şekil 7.41'de saf ve SBS katkılı BSK'ların yol kenar bölgesi ve tekerlek geçiş bölgesindeki sıkıştırma dereceleri ölçümlerinin karşılaştırılması yapılmıştır.



Şekil 7.40. Normal ve SBS katkılı BSK yol kenarı sıkıştırma dereceleri yüzdesi



Şekil 7.41. Normal ve SBS katkılı BSK tekerlek geçiş bölgesi sıkıştırma dereceleri yüzdesi

Şekil 7.40 ve Şekil 7.41'deki asfalt betonu kaplamalardaki sıkıştırma dereceleri ölçümleri karşılaştırıldığında; yol kenarındaki sıkıştırma dereceleri ortalamaları tekerlek

geçiş bölgelerindekine göre daha düşük olup, SBS katkılı asfalt betonu kaplamalardaki sıkıştırma derecesi ortalaması katkısızlara göre 12. ay sonunda %1,65’lik bir artışla daha fazla olduğu tespit edilmiştir.

7.2.2.4. Numunelerin Alındığı Kesimlerdeki Tekerlek İzi Ölçümleri

Tekerlek izi derinliğini ölçmek için 1,8 m. uzunluğunda düz bir master kullanılmıştır. Master, gidiş yönüne dik, taşıt geçiş bölgelerindeki tekerlek izi üzerine enlemesine yerleştirilerek kumpas aleti ile maksimum tekerlek izi derinlik ölçülmüştür (Şekil 7.42). Tekerlek izi boyunca 2 m.’de bir ölçümler alınmış ve ortalaması tekerlek izi derinliği olarak bulunmuştur. Tekerlek izi derinlikleri tespitinde yolun taşıt trafiğine açıldığı zaman dikkate alınarak aşınma kaplama tabakalarındaki 1., 4., 8. ve 12. aydaki periyotlardaki ölçümler değerlendirilmiştir.



Şekil 7.42. Tekerlek izi ölçümleri

Tablo 7.20’de katkısız BSK’lara ait aşınma tabakasında, karot numunelerinin alındığı kesimlerdeki tekerlek izi ölçümleri gösterilmiştir.

Tablo 7.20. Normal katkısız numunelerin alındığı kesimlerdeki tekerlek izi ölçümleri

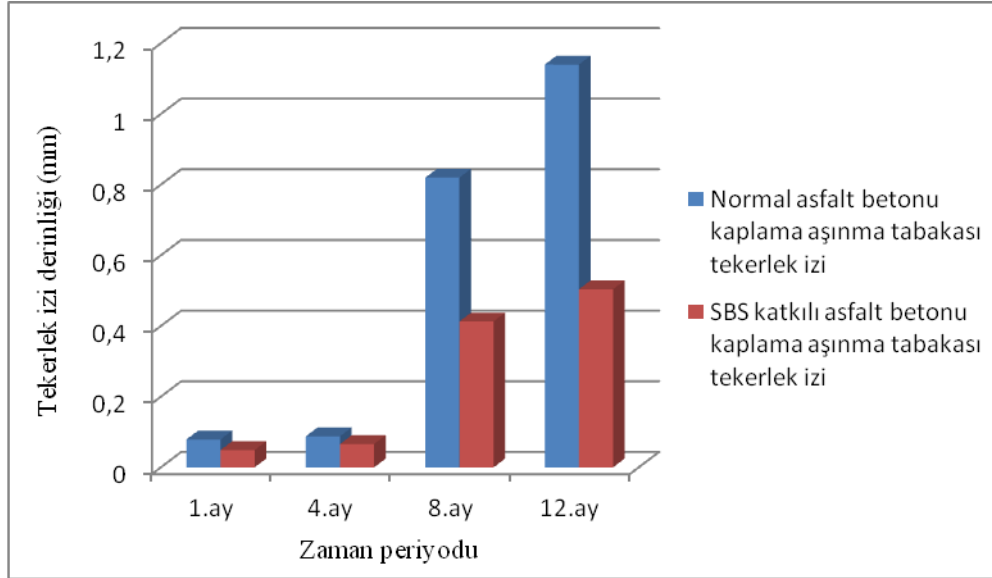
Karışım tipi	Ölçüm yeri	Ölçüm No	Ölçüm zamanı	1. ay	4. ay	8. ay	12. ay
Katkısız asfalt betonu kaplama	Tekerlek geçiş bölgesi	1	Tekerlek izi derinliği (mm)	0,087	0,093	1,16	1,20
		2		0,091	0,099	1,26	1,28
		3		0,088	0,094	0,23	1,21
		4		0,083	0,089	0,26	1,25
		5		0,095	0,098	0,12	1,33
		6		0,054	0,087	1,39	1,41
		7		0,057	0,063	1,35	1,38
		8		0,078	0,083	1,02	1,10
		9		0,078	0,089	0,62	1,08
Tekerlek izi derinliği ortalaması (mm)				0,079	0,088	0,82	1,14

Tablo 7.21’de SBS katkılı BSK aşınma tabakasında, karot numunelerinin alındığı kesimlerdeki tekerlek izi ölçümleri gösterilmiştir.

Tablo 7.21. SBS katkılı numunelerin alındığı kesimlerdeki tekerlek izi ölçümleri

Karışım tipi	Ölçüm yeri	Ölçüm No	Ölçüm zamanı	1. ay	4. ay	8. ay	12. ay
SBS katkılı asfalt betonu kaplama	Tekerlek geçiş bölgesi	1	Tekerlek izi derinliği (mm)	0,048	0,063	0,39	0,41
		2		0,053	0,060	0,43	0,44
		3		0,053	0,055	0,15	0,42
		4		0,044	0,041	0,43	0,55
		5		0,051	0,071	0,41	0,59
		6		0,052	0,073	0,38	0,49
		7		0,052	0,077	0,43	0,47
		8		0,045	0,099	0,43	0,48
		9		0,043	0,058	0,67	0,69
Tekerlek izi derinliği ortalaması (mm)				0,049	0,066	0,413	0,504

Şekil 7.43’te saf ve SBS katkılı asfalt betonu kaplamaların belli periyotlardaki tekerlek izi derinlik değerlerinin karşılaştırılması yapılmıştır.



Şekil 7.43. Zamana bağlı normal ve SBS katkılı asfalt betonu kaplama tekerlek izi değişimi

Tekerlek izi ölçümleri bakımından katkısız asfalt betonu kaplama için aşınma tabakasında, bir yıl sonunda numunelerin alındığı kesimlerdeki ortalama tekerlek izi derinliği 1,14 mm, SBS katkılı asfalt betonu kaplamalarda ise ortalama tekerlek izi derinliği 0,504 mm olarak ölçülmüştür. Katkısız BSK tekerlek izi ölçümleri ortalama değeri, SBS katkılı sıcak karışımlardaki tekerlek izi ölçüm ortalamasına göre yaklaşık %50 daha fazla olduğu görülmüştür.

Şekil 7.43'te zamana bağlı saf asfalt betonu kaplamalardaki tekerlek izi derinliklerinde SBS katkılılara göre; 1. ayda %61,22, 4. ayda %33,33, 8. ayda %98,54 ve 12. ayda %126,19'luk bir oranda artış meydana gelmiştir.

7.2.2.5. Numunelerin Alındığı Kesimlerdeki Schmidt Test Çekici Ölçümleri

Esnek yol kaplamasındaki yüzey sertliği durumunun belirlenmesinde taşıt tekerleği geçiş bölgelerindeki schmidt çekici kullanılarak, 4m'de bir asfalt betonu aşınma tabakasındaki zamana bağlı başlangıç ve trafik etkisinde meydana gelen sıkıştırma özellikleriyle ilgili yüzey sertliği ölçümleri yapılmıştır. Yüzey sertliği ölçümlerinden asfalt betonu kaplamaların basınç dayanımı (f_{ck}) tespit edilmiştir.

Şekil 7.44'teki mekanik schmidt test çekici ile ölçümler yapılarak, sonuçlar Tablo 7.22 - Tablo 7.29'da gösterilmiştir.



Şekil 7.44. Tekerlek geçiş bölgesi test çekici ölçümleri

Tablo 7.22. Katkısız asfalt betonu kaplama 1. ay yüzey sertliği ölçümleri ve basınç dayanımları

Numune tipi		Katkısız															
Konumu		Kenar						Ort.	Basınç dayanımı (MPa)	Tekerlek geçiş bölgesi						Ort.	Basınç dayanımı (MPa)
Ölçüm aralığı		1. ay								1. ay							
Ölçüm değerleri		Yüzey sertliği								Yüzey sertliği							
Numune No	1	10	10	10	11	11	10	10,33	5,21	10	10	11	11	10	10	10,33	5,21
	2	9	8	8	8	9	9	8,50	4,04	10	10	10	12	10	11	10,50	5,33
	3	9	8	9	9	8	9	8,67	4,14	10	10	10	10	11	10	10,17	5,10
	4	10	14	10	13	12	10	11,50	6,06	11	11	10	11	11	10	10,67	5,45
	5	9	9	8	9	8	9	8,67	4,14	11	10	10	10	10	11	10,33	5,21
	6	9	10	9	9	10	9	9,33	4,55	11	9	10	10	11	10	10,17	5,10
	7	9	9	9	10	9	10	9,33	4,55	9	12	12	13	11	12	11,50	6,06
	8	10	12	10	10	11	10	10,50	5,33	10	12	9	10	11	10	10,33	5,21
	9	10	11	9	10	9	11	10,00	4,98	9	10	12	11	12	10	10,67	5,45
	Ort.								4,78	Ort.						5,35	
	Standart sapma								0,68	Standart sapma						0,30	
	Ort. basınç dayanımı								4,10	Ort. basınç dayanımı						5,05	

Numune No : 1

Ortalama yüzey sertliği : $\Sigma(\text{yüzey sertliği}) / \Sigma(\text{ölçüm sayısı})$ (7.14)

Basınç dayanımı fonksiyonu (Bu fonksiyon test çekici üzerindeki $\alpha = -90^\circ$ olan grafikten elde edilmiştir.) : $y = -0,0003x^3 + 0,0375x^2 + 0,0142x + 1,3917$

Katkısız numuneler sağ dış (yol kenarı) : $62 / 6 = 10,33$

Sağ dış basınç dayanımı : $y = -0,0003(10,33)^3 + 0,0375(10,33)^2 + 0,0142(10,33) + 1,3917$
 $y = 5,21 \text{ MPa}$

Katkısız numuneler sağ iç (yol ekseni) : $568 / 54 = 10,52 \text{ MPa}$

Sağ iç basınç dayanımı : $5,21 \text{ MPa}$

Tablo 7.23. Katkısız asfalt betonu kaplama 4. ay yüzey sertliği ölçümleri ve basınç dayanımları

Numune tipi		Katkısız															
Konumu		Kenar						Ort.	Basınç dayanımı (MPa)	Tekerlek geçiş bölgesi						Ort.	Basınç dayanımı (MPa)
Ölçüm aralığı		4. ay								4. ay							
Ölçüm değerleri		Yüzey sertliği								Yüzey sertliği							
Numune No	1	13	14	18	16	14	14	14,83	8,87	14	12	14	18	20	15	15,50	9,50
	2	18	16	14	12	14	16	15,00	9,03	14	12	12	14	20	16	14,67	8,72
	3	14	16	14	12	14	16	14,33	8,42	14	16	20	14	17	18	16,50	10,49
	4	12	17	15	11	16	16	14,50	8,57	18	16	16	20	24	14	18,00	12,05
	5	16	16	14	18	16	18	16,33	10,32	14	22	22	14	18	20	18,33	12,41
	6	18	19	20	16	19	16	18,00	12,05	18	20	20	19	22	23	20,33	14,66
	7	20	20	18	18	20	22	19,67	13,89	22	22	18	22	18	20	20,33	14,66
	8	15	15	14	20	15	15	15,67	9,66	16	20	18	14	14	13	15,83	9,83
	9	19	18	19	16	12	18	17,00	11,00	22	24	20	16	16	12	18,33	12,41
	Ort.							10,20	Ort.						11,64		
	Standart sapma							1,84	Standart sapma						2,16		
	Ort. basınç dayanımı							8,37	Ort. basınç dayanımı						9,48		

Tablo 7.24. Katkısız asfalt betonu kaplama 8. ay yüzey sertliği ölçümleri ve basınç dayanımları

Numune tipi		Katkısız															
Konumu		Kenar						Ort.	Basınç dayanımı (MPa)	Tekerlek geçiş bölgesi						Ort.	Basınç dayanımı (MPa)
Ölçüm aralığı		8. ay								8. ay							
Ölçüm değerleri		Yüzey sertliği								Yüzey sertliği							
Numune No	1	20	16	18	20	16	18	18,00	12,05	18	30	30	20	20	25	23,83	18,97
	2	16	16	18	17	18	16	16,83	10,83	14	18	18	18	14	18	16,67	10,66
	3	16	16	20	19	19	20	18,33	12,41	18	32	16	17	22	22	21,17	15,65
	4	18	17	19	20	18	19	18,50	12,59	22	28	18	19	22	24	22,17	16,86
	5	18	16	20	14	20	19	17,83	11,87	26	28	24	26	25	24	25,50	21,16
	6	16	14	18	18	20	22	18,00	12,05	30	20	18	32	22	23	24,17	19,40
	7	17	24	22	22	20	22	21,17	15,65	24	26	26	25	24	26	25,17	20,72
	8	20	20	19	19	17	17	18,67	12,77	16	22	25	23	22	24	22,00	16,66
	9	20	21	20	16	18	19	19,00	13,14	23	25	21	19	23	19	21,67	16,25
	Ort.								12,59	Ort.						17,37	
	Standart sapma								1,32	Standart sapma						3,21	
	Ort. basınç dayanımı								11,27	Ort. basınç dayanımı						14,16	

Tablo 7.25. Katkısız asfalt betonu kaplama 12. ay yüzey sertliği ölçümleri ve basınç dayanımları

Numune tipi		Katkısız															
Konumu		Kenar						Ort.	Basınç dayanımı (MPa)	Tekerlek geçiş bölgesi						Ort.	Basınç dayanımı (MPa)
Ölçüm aralığı		12. ay								12. ay							
Ölçüm değerleri		Yüzey sertliği								Yüzey sertliği							
Numune No	1	21	17	18	21	18	19	19,00	13,14	19	29	28	27	23	25	25,17	20,72
	2	18	16	19	19	18	17	17,83	11,87	18	20	21	20	20	19	19,67	13,89
	3	17	16	21	20	20	21	19,17	13,33	19	32	20	25	28	29	25,50	21,16
	4	19	17	18	21	19	20	19,00	13,14	23	28	19	20	24	14	21,33	15,85
	5	19	16	21	18	20	18	18,67	12,77	27	29	25	27	28	25	26,83	22,98
	6	18	19	20	19	21	22	19,83	14,08	30	22	20	25	32	27	26,00	21,84
	7	20	24	23	23	20	22	22,00	16,66	26	27	27	28	28	28	27,33	23,67
	8	22	21	19	20	18	19	19,83	14,08	22	23	26	24	24	27	24,33	19,62
	9	20	22	21	18	19	19	19,83	14,08	25	27	23	20	24	22	23,50	18,54
	Ort.								13,68	Ort.						19,81	
	Standart sapma								1,33	Standart sapma						3,24	
	Ort. basınç dayanımı								12,35	Ort. basınç dayanımı						16,57	

Tablo 7.26. SBS katkılı asfalt betonu kaplama 1. ay yüzey sertliği ölçümleri ve basınç dayanımları

Numune tipi		SBS katkılı															
Konumu		Kenar						Ort.	Basınç dayanımı (MPa)	Tekerlek geçiş bölgesi						Ort.	Basınç dayanımı (MPa)
Ölçüm aralığı		1. ay								1. ay							
Ölçüm değerleri		Yüzey sertliği								Yüzey sertliği							
Numune No	1	11	10	11	10	11	10	11,17	5,81	11	11	11	12	11	12	11,50	6,06
	2	14	12	12	10	11	10	12,33	6,71	13	11	11	12	13	11	11,67	6,19
	3	13	16	12	10	10	11	13,33	7,54	14	11	11	11	13	12	12,33	6,71
	4	11	13	11	10	10	10	11,50	6,06	11	10	10	11	10	12	11,67	6,19
	5	12	10	14	10	11	10	12,50	6,84	12	11	13	12	13	11	11,67	6,19
	6	10	12	10	11	10	11	10,67	5,45	13	12	10	11	12	13	12,00	6,44
	7	10	10	10	12	11	10	12,00	6,44	14	15	13	12	13	13	13,00	7,25
	8	12	11	13	11	12	11	11,83	6,31	13	11	10	11	12	13	11,50	6,06
	9	11	10	12	11	12	11	11,83	6,31	13	12	11	12	11	11	12,17	6,58
	Ort.								6,39	Ort.						6,41	
	Standart sapma								0,61	Standart sapma						0,39	
	Ort. basınç dayanımı								5,78	Ort. basınç dayanımı						6,01	

Tablo 7.27. SBS katkılı asfalt betonu kaplama 4. ay yüzey sertliği ölçümleri ve basınç dayanımları

Numune tipi		SBS katkılı															
Konumu		Kenar						Ort.	Basınç dayanımı (MPa)	Tekerlek geçiş bölgesi						Ort.	Basınç dayanımı (MPa)
Ölçüm aralığı		4. ay								4. ay							
Ölçüm değerleri		Yüzey sertliği								Yüzey sertliği							
Numune No	1	14	12	18	20	19	16	16,50	10,49	22	19	26	20	18	18	20,50	14,86
	2	19	22	20	19	21	19	20,00	14,28	20	20	22	22	23	21	21,33	15,85
	3	20	22	22	24	20	15	20,50	14,86	22	18	20	20	22	24	21,00	15,45
	4	16	17	18	18	19	16	17,33	11,34	20	22	20	22	17	20	20,17	14,47
	5	12	20	21	20	24	18	19,17	13,33	22	24	22	24	22	24	23,00	17,91
	6	19	17	22	17	20	18	18,83	12,96	24	22	28	24	24	20	23,67	18,76
	7	20	18	20	20	18	22	19,67	13,89	18	18	20	22	20	22	20,00	14,28
	8	12	16	22	15	22	20	17,83	11,87	16	20	20	16	18	20	18,33	12,41
	9	22	20	20	22	22	20	21,00	15,45	20	22	22	22	23	19	21,33	15,85
	Ort.							13,16	Ort.						15,54		
	Standart sapma							1,66	Standart sapma						1,91		
	Ort. basınç dayanımı							11,50	Ort. basınç dayanımı						13,63		

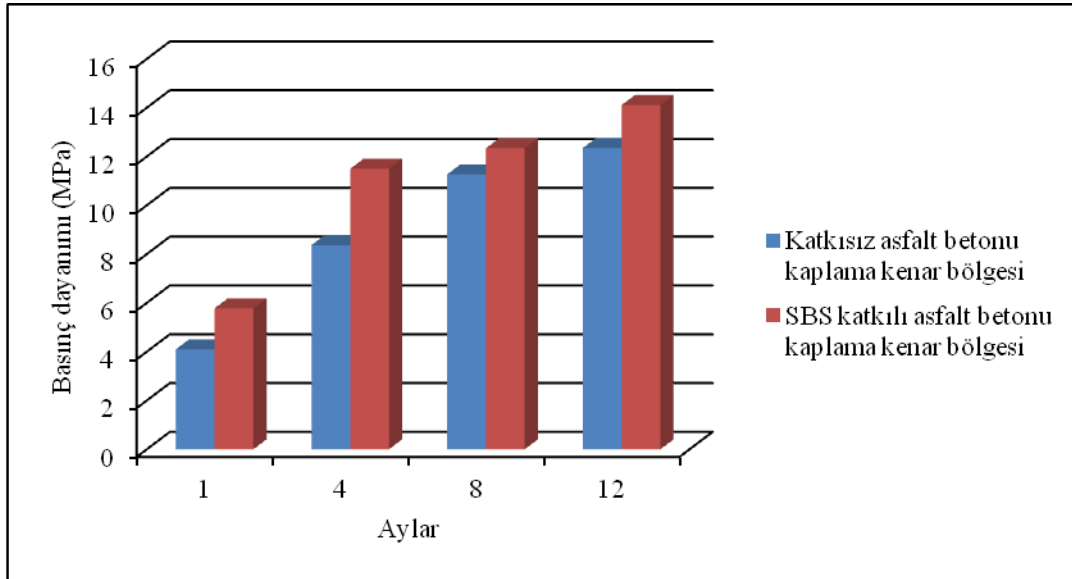
Tablo 7.28. SBS katkılı asfalt betonu kaplama 8. ay yüzey sertliği ölçümleri ve basınç dayanımları

Numune tipi		SBS katkılı															
Konumu		Kenar						Ort.	Basınç dayanımı (MPa)	Tekerlek geçiş bölgesi						Ort.	Basınç dayanımı (MPa)
Ölçüm aralığı		8. ay								8. ay							
Ölçüm değerleri		Yüzey sertliği								Yüzey sertliği							
Numune No	1	14	12	18	20	19	16	18,17	12,23	22	19	26	20	18	18	23,50	18,54
	2	19	22	20	19	21	19	20,50	14,86	20	20	22	22	23	21	21,50	16,05
	3	20	22	22	24	20	15	18,83	12,96	22	18	20	18	22	24	24,33	19,62
	4	16	17	18	18	19	16	21,33	15,85	20	22	20	22	17	20	21,17	15,65
	5	12	20	21	20	24	18	20,17	14,47	22	24	22	24	22	24	22,67	17,49
	6	19	17	22	17	20	18	21,83	16,46	24	22	28	24	24	20	22,67	17,49
	7	20	24	20	20	18	22	18,50	12,59	18	18	20	18	22	18	23,67	18,76
	8	12	16	22	15	22	20	17,83	11,87	16	20	16	18	20	20	19,67	13,89
	9	22	20	20	22	22	23	20,17	14,47	20	22	22	18	22	18	22,67	17,49
	Ort.								13,97	Ort.						17,22	
	Standart sapma								1,63	Standart sapma						1,77	
	Ort. basınç dayanımı								12,34	Ort. basınç dayanımı						15,45	

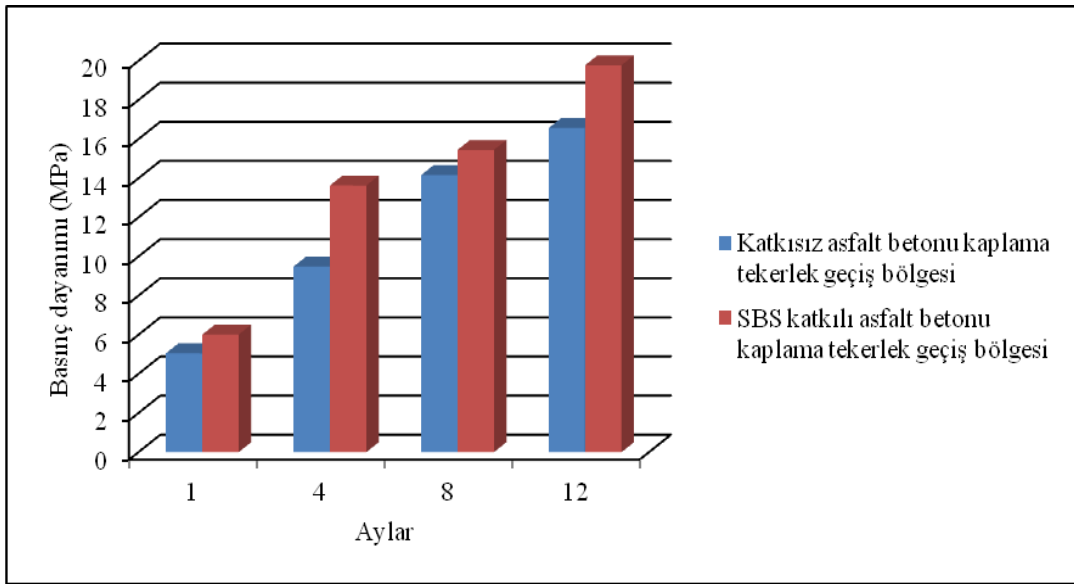
Tablo 7.29. SBS katkılı asfalt betonu kaplama 12. ay yüzey sertliği ölçümleri ve basınç dayanımları

Numune tipi		SBS katkılı															
Konumu		Kenar						Ort.	Basınç dayanımı (MPa)	Tekerlek geçiş bölgesi						Ort.	Basınç dayanımı (MPa)
Ölçüm aralığı										12. ay							
Ölçüm değerleri		Yüzey sertliği								Yüzey sertliği							
Numune No	1	16	18	14	22	17	18	20,67	15,05	20	24	26	22	23	25	27,83	24,37
	2	18	20	26	19	20	22	19,17	13,33	26	20	18	21	20	19	22,67	17,49
	3	14	19	20	20	18	19	20,67	15,05	28	22	24	25	24	23	26,83	22,98
	4	23	20	22	18	21	19	20,00	14,28	20	16	17	18	19	21	24,17	19,40
	5	22	16	18	21	18	20	20,67	15,05	24	24	22	20	23	21	27,83	24,37
	6	20	22	24	23	20	21	21,33	15,85	23	20	26	24	22	23	27,83	24,37
	7	18	16	18	20	19	20	22,67	17,49	22	26	24	22	22	20	30,33	27,95
	8	21	22	20	19	21	23	20,83	15,25	24	26	20	23	22	20	27,17	23,44
	9	20	21	23	22	19	23	22,00	16,66	20	19	22	21	20	23	25,67	21,39
	Ort.								15,33	Ort.						22,86	
	Standart sapma								1,23	Standart sapma						3,08	
	Ort. basınç dayanımı								14,11	Ort. basınç dayanımı						19,78	

Katkısız ve SBS katkılı asfalt betonu kaplama aşınma tabakası kenar bölgesi ve tekerlek geçiş bölgesi Schmidt test çekici ile yüzey sertliği ölçüm sonuçlarından elde edilen ortalama basınç dayanım değerlerinin karşılaştırması Şekil 7.45 ve Şekil 7.46’da gösterilmiştir.

**Şekil 7.45.** Katkısız ve SBS katkılı asfalt betonu kaplama kenar bölgesi basınç dayanımı değişimi

Şekil 7.45 incelendiğinde, katkısız ve SBS katkılı asfalt betonu kaplama yol kenar bölgesindeki 1 yıllık periyotta Schmidt çekiciyle yüzey sertliği ölçümü ve basınç dayanımı tespitinde; saf ve katkılı BSK yüzey sertliği ve basınç dayanımı ölçümlerinin aylık periyotlarda artış gösterdiği, SBS katkılı BSK basınç dayanımı artışlarının katkısız BSK'lara göre daha fazla olduğu görülmektedir. En düşük basınç dayanımı 1. ayda saf BSK'larda 4,10 MPa, en büyük basınç dayanımı ise 12. ayda SBS katkılı BSK'larda 14,11 MPa olup, saf BSK'lara göre 1. ayda %40,98'lik, 12. ayda %14,25'lik bir artış görülmüştür.



Şekil 7.46. Katkısız ve SBS katkılı asfalt betonu kaplama tekerlek geçiş bölgesi basınç dayanımı değişimi

Şekil 7.46'da, katkısız ve SBS katkılı BSK'lara ait belli zaman aralıklarındaki tekerlek geçiş noktalarında Schmidt çekiciyle yapılan yüzey sertliği ölçümlerinde; saf ve SBS katkılı BSK'lardaki yüzey sertliklerinin dolayısıyla basınç dayanımlarının artış gösterdiği, SBS katkılı asfalt betonu kaplamalardaki basınç dayanım değişimlerinin katkısız olan kaplamalara göre daha büyük değerlerde olduğu saptanmıştır. En büyük basınç dayanımı değeri, trafik hacmin olduğu SBS katkılı asfalt betonu kaplama tekerlek geçiş bölgelerinde tespit edilmiştir. En düşük basınç dayanımı 1. ayda saf BSK'larda 5,05 MPa, en yüksek basınç dayanımı ise 12. ayda SBS katkılı BSK'larda 19,78 MPa olarak tespit edilmiş olup, saf BSK'lara göre 1. ayda %19'luk 12. ayda ise %19,37'lik artış görülmüştür.

7.2.2.6. Deneme Yolu Trafik Ölçüm Değerleri

Numunelerin alındığı kesimlere ait trafik değerleri, bu kesimlerin trafiğe açıldıktan sonraki 1. ay, 4. ay, 8. ay ve 12. aylık süreler dikkate alınarak bir yıllık süre zarfında geçen toplam trafik ölçüm değerlerini kapsamaktadır.

Yolun normal ve SBS katkılı asfalt betonu kaplama aşınma tabakası sağ şeritlerine yerleştirilen QTT (NC 200) trafik analiz cihazı ile 15 günlük periyotlar halinde ölçümler yapılarak toplam taşıt sayısı, cinsleri, hızları, kaplama sıcaklıkları gibi değerleri tespit edilmiştir. Taşıt eşdeğerlik faktörleri esas alınarak, numunelerin alındığı sağ şeritlerden geçen toplam eşdeğer standart dingil yükleri hesaplanmıştır.

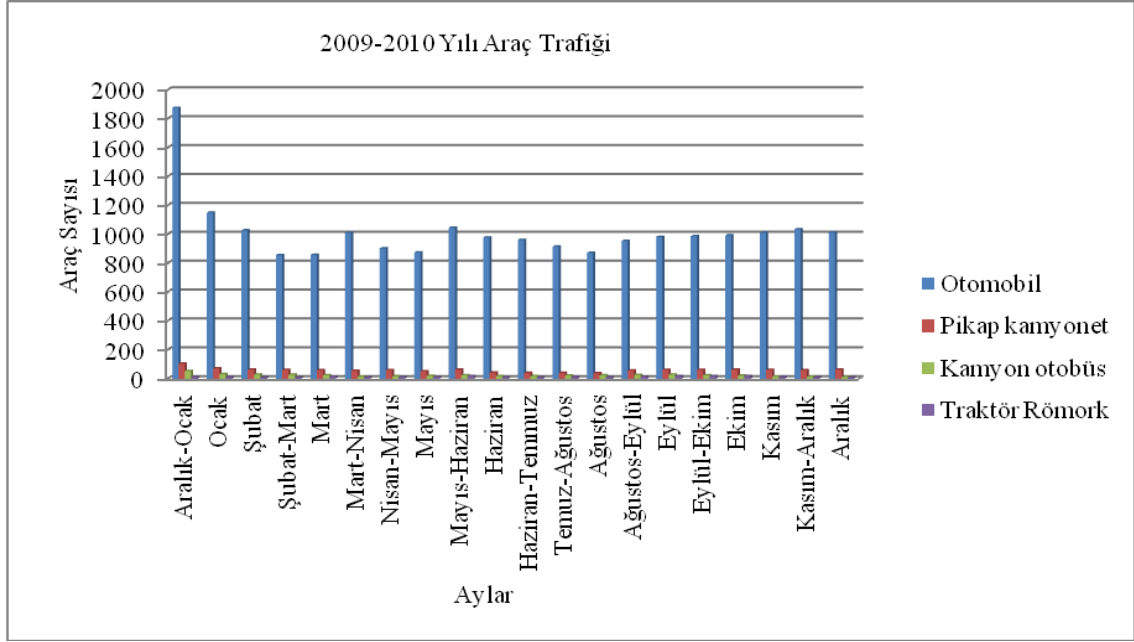
Katkısız ve katkılı BSK karot numunelerinin alındığı yol güzergahı Aralık 2009'da trafiğe açılmıştır. Numunelerin alınmasına Aralık 2009'da başlanmıştır. Dolayısıyla kaplama, 2009-2010 dönemlerinde 365 gün trafiğe hizmet vermiştir.

Tablo 7.30'da 1 yıllık zaman periyodunda normal ve SBS katkılı BSK karışım bölgesinden 20302 otomobil, 1178 pikap-kamyonet, 473 kamyon, 244 traktör römork olmak üzere toplam 22197 taşıt sayısı ölçülmüştür.

Tablo 7.30. Katkısız ve SBS katkılı BSK zaman periyoduna bağlı taşıt tipi ve sayısı

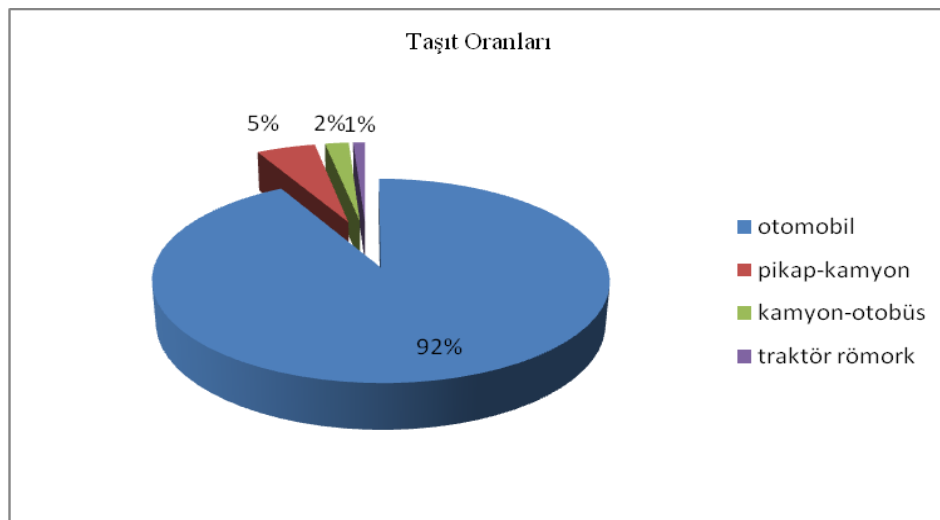
Zaman Periyotları	Otomobil	Pikap kamyonet	Kamyon otobüs	Traktör Römork	Toplam t.sayısı
Aralık-Ocak	1875	104	54	12	2045
Ocak	1150	72	32	11	1265
Şubat	1028	63	29	9	1129
Şubat-Mart	856	62	28	9	955
Mart	857	60	25	14	956
Mart-Nisan	1011	55	15	10	1091
Nisan-Mayıs	902	60	17	12	991
Mayıs	875	52	21	12	960
Mayıs-Haziran	1045	63	24	18	1150
Haziran	978	42	19	10	1049
Haziran-Temmuz	961	40	18	10	1029
Temuz-Ağustos	915	40	23	11	989
Ağustos	872	38	24	10	944
Ağustos-Eylül	955	57	27	14	1053
Eylül	982	62	28	17	1089
Eylül-Ekim	987	62	25	18	1092
Ekim	993	63	22	18	1096
Kasım	1012	61	16	11	1100
Kasım-Aralık	1035	59	14	9	1117
Aralık	1013	63	12	9	1097
Genel toplam	20302	1178	473	244	22197
Genel oran	0,92	0,05	0,02	0,01	

Şekil 7.47’de 2009-2010 yılı araç trafiği bakımından en büyük payı otomobiller oluşturmaktadır. Sayım sonuçlarına göre taşıt miktarı Aralık, Ocak ayları dönemlerinde diğer aylara göre daha fazla görülmektedir. En fazla taşıt sayısı 2045 olarak Aralık-Ocak ayları döneminde, en az taşıt sayısı ise 944 ile Ağustos ayı döneminde görülmüştür. Diğer aylardaki ölçüm sonuçları birbirine yakın değerlere sahiptir.



Şekil 7.47. 2009-2010 yılı katkısız ve SBS katkılı BSK araç trafiği

Şekil 7.48’de taşıt cinslerine göre oranlar verilmiştir.



Şekil 7.48. Katkısız ve SBS katkılı BSK taşıt oranları

Şekil 7.48’de katkısız ve SBS katkılı BSK’dan geçen taşıt miktarı olarak otomobiller %92, pikap-kamyonetler %5, kamyon-otobüsler %2, traktör römorklar ise %1’lik bir oranı oluşturmaktadır.

Tablo 7.31’de görüldüğü üzere 12 aylık süre zarfında katkısız BSK yol yüzeyine etki eden kümülatif toplam eşdeğer standart dingil yükü (ESDY) 7432 olarak tespit edilmiştir.

Tablo 7.31. Katkısız ve SBS katkılı BSK aşınma tabakası sağ şerit tekerlek geçiş bölgesi toplam eşdeğer standart dingil hesabı

Karışım cinsi			Katkısız ve SBS katkılı BSK			
Ölçüm yeri			Asfalt betonu kaplama aşınma tabakası sağ şerit			
Trafik tipi			Eşdeğer toplam standart dingil yükü			
Taşıt özelliği			Hafif taşıt		Ağır taşıt	
Taşıt türü			Otomobil	Kamyonet-pikap	Otobüs-kamyon	Römork çekici
Yıllar	2009-2010 (365 gün)	Aylar				
		1. ay	3025	176	86	23
		4. ay	8554	528	221	89
		8. ay	16249	932	409	197
		12. ay	20302	1178	473	244
Toplam Trafik			41150	2814	1189	553
Eşdeğerlik Faktörleri*			0,0006	0,60	2,90	4,10
Eşdeğer Standart Dingil			29	1688	3448	2267
Toplam Eşdeğer Standart dingil			7432			
Hesap Şeridindeki Toplam Eşdeğer Standart Dingil (Yön dağıtma faktörü = 1,00) (Şerit dağıtma faktörü = 1,00)			7432			
* Karayolları Esnek Üstyapılar Projelendirme Rehberi [192].						

7.2.2.7. Katkısız BSK Yüzey Sıcaklık Ölçüm Değerleri

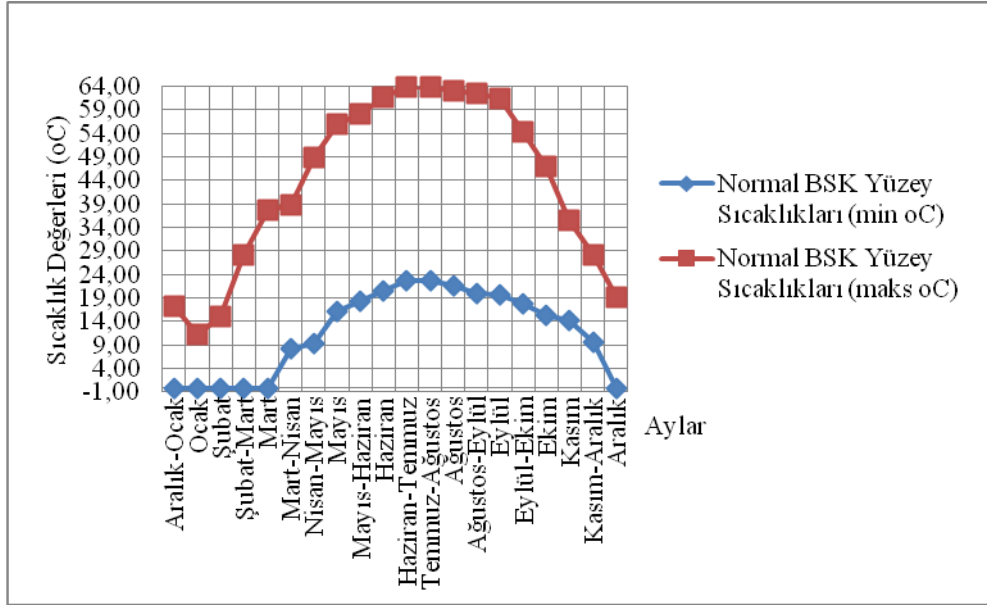
Katkısız BSK karışımlarda trafik analiz cihazıyla 15 dakikalık periyotlarda ölçüm yapılmak üzere günlük asfalt yüzeyi sıcaklık ölçümleri ile 1 yıllık süre zarfındaki sıcaklık verileri elde edilmiştir.

Aylık periyotlardaki minimum ve maksimum sıcaklık değerleri ve sıcaklık ortalamaları Tablo 7.32’de gösterilmiştir. En yüksek ortalama aylık sıcaklık değerleri Haziran, Temmuz dönemlerinde 43,29°C, en düşük sıcaklık değerleri ise Aralık, Ocak ayı dönemlerinde 7,04°C olarak elde edilmiştir.

Tablo 7.32. Katkısız BSK zaman periyotlarına bağı sıcaklık değerleri

Zaman Periyotları	Sıcaklık değerleri		
Aylar	min. (°C)	maks. (°C)	ortalama sıcaklıklar (°C)
Aralık-Ocak	-0,06	17,17	7,04
Ocak	-0,25	11,28	
Şubat	-0,10	15,12	10,81
Şubat-Mart	-0,06	28,28	
Mart	-0,06	37,72	21,19
Mart-Nisan	8,28	38,83	
Nisan-Mayıs	9,39	48,83	32,59
Mayıs	16,06	56,06	
Mayıs-Haziran	18,28	58,28	39,67
Haziran	20,50	61,61	
Haziran-Temmuz	22,64	63,94	43,29
Temmuz-Ağustos	22,61	63,98	
Ağustos	21,50	63,14	41,8
Ağustos-Eylül	20,12	62,44	
Eylül	19,82	61,55	38,38
Eylül-Ekim	17,80	54,33	
Ekim	15,24	47,12	28,05
Kasım	14,37	35,45	
Kasım-Aralık	9,52	28,18	14,21
Aralık	-0,11	19,24	

Şekil 7.49’da katkısız asfalt betonu kaplamaların minimum sıcaklık değeri Ocak ayında -0,25°C, maksimum sıcaklık değeri ise 63,98°C olarak Temmuz, Ağustos ayları döneminde ölçülmüştür. Sıcaklık değerleri Haziran-Eylül ayları döneminde yüksek değerlerde olup, birbirine yakın değerlerdir.



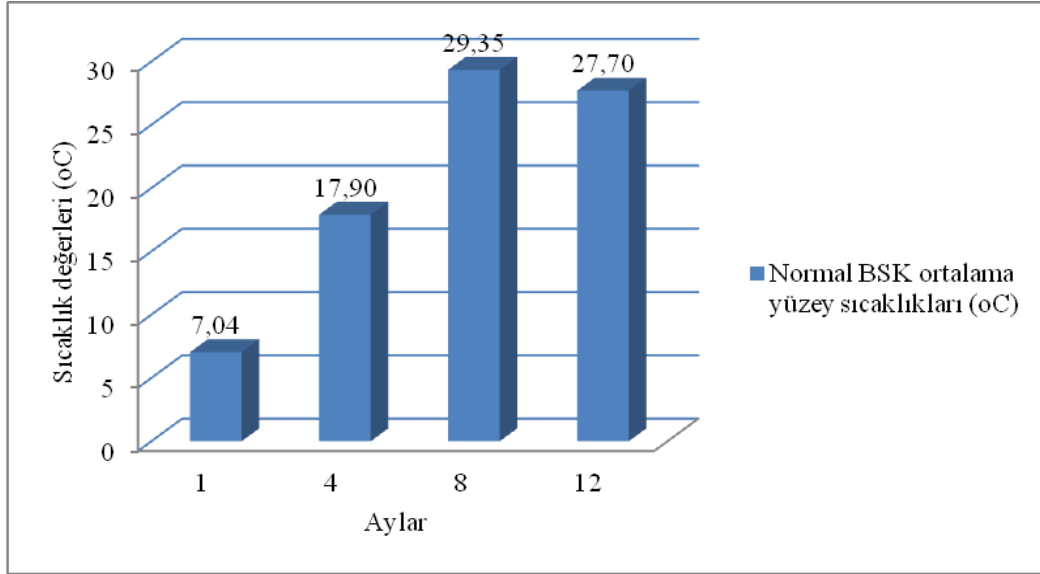
Şekil 7.49. Katkısız BSK aylık en düşük ve en yüksek sıcaklık değerleri karşılaştırması

Tablo 7.33'te normal asfalt betonu kaplamaların belli periyotlardaki aylık ortalama sıcaklık değerleri karşılaştırılmıştır.

Tablo 7.33. Normal BSK aşınma tabakası sağ şerit ortalama sıcaklık değerleri

Karışım cinsi	Katkısız BSK			
Ölçüm yeri	Asfalt betonu kaplama aşınma tabakası sağ şerit			
Ölçüm zamanı	Aralık 2009	Nisan 2010	Ağustos 2010	Aralık 2010
Ölçüm periyodu	1. ay	4. ay	8. ay	12. ay
Ortalama Sıcaklık (oC)	7,04	17,90	29,35	27,70

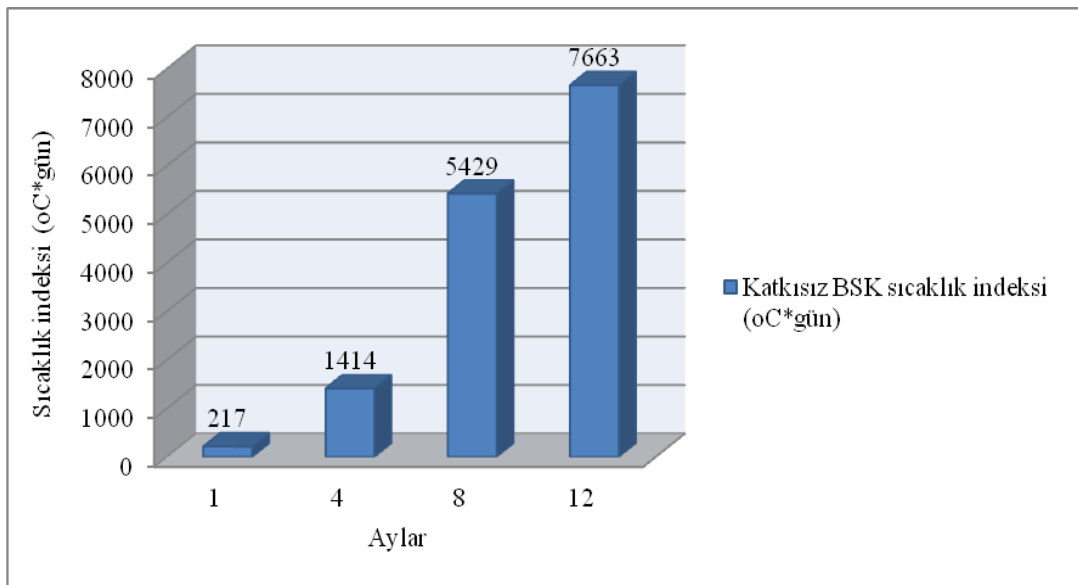
Şekil 7.50'de katkısız BSK ortalama yüzey sıcaklık değerlerinin belli periyotlardaki değişimi gösterilmiştir. Katkısız BSK üzerindeki ortalama yüzey sıcaklıkları olarak en düşük sıcaklık değeri 1. ayda 7,04°C, en yüksek sıcaklık değeri 29,35°C ile 8. ayda elde edilmiştir. 12. ayda ortalama yüzey sıcaklık değeri ise 27,70°C olarak tespit edilmiş, dolayısıyla 8. aydan sonra ortalama yüzey sıcaklık değerinde düşüş görülmüştür.



Şekil 7.50. Katkısız BSK ortalama yüzey sıcaklıkları

Şekil 7.51’de katkısız asfalt betonu kaplama yüzey sıcaklık indeksi değerlerinin belli periyotlardaki değişimi gösterilmiştir.

Katkısız BSK yol yüzeyi sıcaklık değerlerinin gün sayısı toplamı kümülatif olarak belirlenip, sıcaklık indeksi sayısı ve toplam sıcaklık indeksi sayısı bir yıllık süre zarfındaki numunelerin alındığı zaman periyotlarında tespit edilmiştir. Sıcaklık indeksi değeri 1. ayda 217°C.gün, 4. ayda 1414°C.gün, 8. ayda 5429°C.gün ve 12. ayda ise 7663°C.gün olarak hesaplanmıştır.



Şekil 7.51. Katkısız BSK sıcaklık indeksleri

7.2.2.8. SBS Katkılı BSK Yüzey Sıcaklık Ölçüm Değerleri

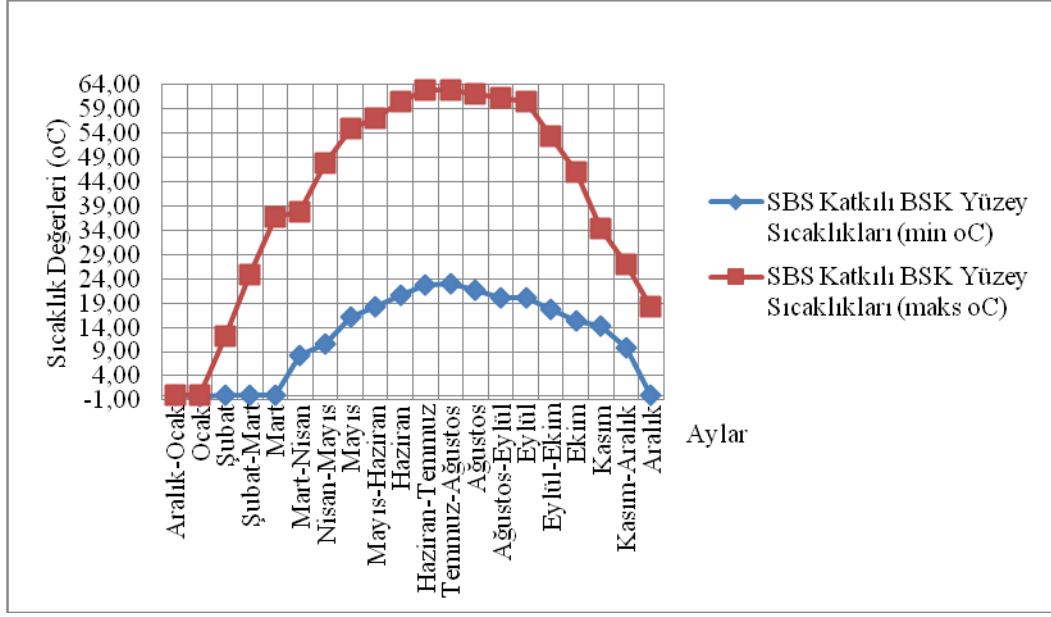
SBS katkılı BSK karışımlarda trafik analiz cihazıyla 15 dakikalık periyotlarda ölçüm yapılmak üzere 1 yıllık süre zarfındaki günlük sıcaklık verileri elde edilmiştir.

Aylık periyotlardaki minimum ve maksimum sıcaklık değerleri ve sıcaklık ortalamaları Tablo 7.34'te gösterilmiştir. En yüksek ortalama aylık sıcaklık değerleri Haziran, Temmuz ve Ağustos dönemlerinde 42,81°C, en düşük sıcaklık değerleri ise Aralık, Ocak ayı dönemlerinde 5,79°C olarak elde edilmiştir.

Tablo 7.34. SBS katkılı BSK zaman periyotlarına bağlı sıcaklık değerleri

Zaman Periyotları	Sıcaklık değerleri		
Aylar	min. (°C)	maks. (°C)	ortalama sıcaklıklar (°C)
Aralık-Ocak	-0,06	14,94	5,79
Ocak	-0,21	8,49	
Şubat	-0,10	12,23	9,25
Şubat-Mart	-0,06	24,94	
Mart	-0,06	36,61	20,64
Mart-Nisan	8,28	37,72	
Nisan-Mayıs	10,50	47,72	32,31
Mayıs	16,06	54,94	
Mayıs-Haziran	18,28	57,17	39,11
Haziran	20,50	60,50	
Haziran-Temmuz	22,64	62,83	42,81
Temmuz-Ağustos	22,91	62,87	
Ağustos	21,62	62,03	41,28
Ağustos-Eylül	20,12	61,33	
Eylül	20,05	60,44	37,88
Eylül-Ekim	17,80	53,22	
Ekim	15,24	46,01	27,5
Kasım	14,40	34,34	
Kasım-Aralık	9,72	27,07	13,72
Aralık	-0,05	18,13	

Şekil 7.52'de SBS katkılı BSK minimum sıcaklık değeri Ocak ayında -0,21°C, maksimum sıcaklık değeri ise 62,87°C olarak Temmuz, Ağustos ayları döneminde ölçülmüştür. Sıcaklık değerleri Haziran-Eylül ayları döneminde yüksek değerlerde olup, birbirine yakın değerlerdedir.



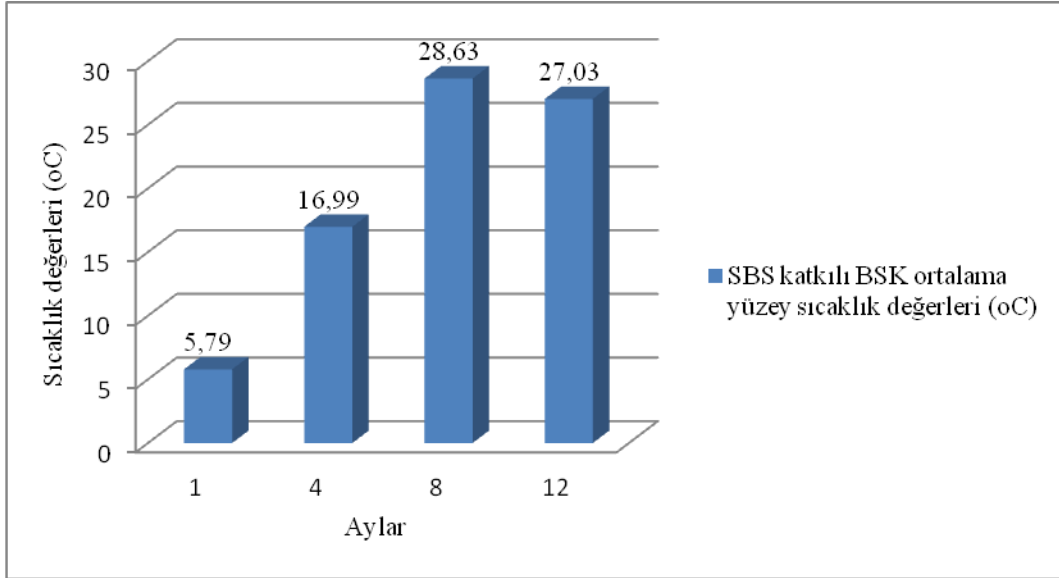
Şekil 7.52. SBS katkılı BSK aylık en düşük ve en yüksek sıcaklık değerleri karşılaştırması

SBS katkılı asfalt betonu kaplamaların belli periyotlardaki aylık ortalama sıcaklık değerleri Tablo 7.35’de verilmiştir.

Tablo 7.35. SBS katkılı BSK aşınma tabakası sağ şerit ortalama sıcaklık değerleri

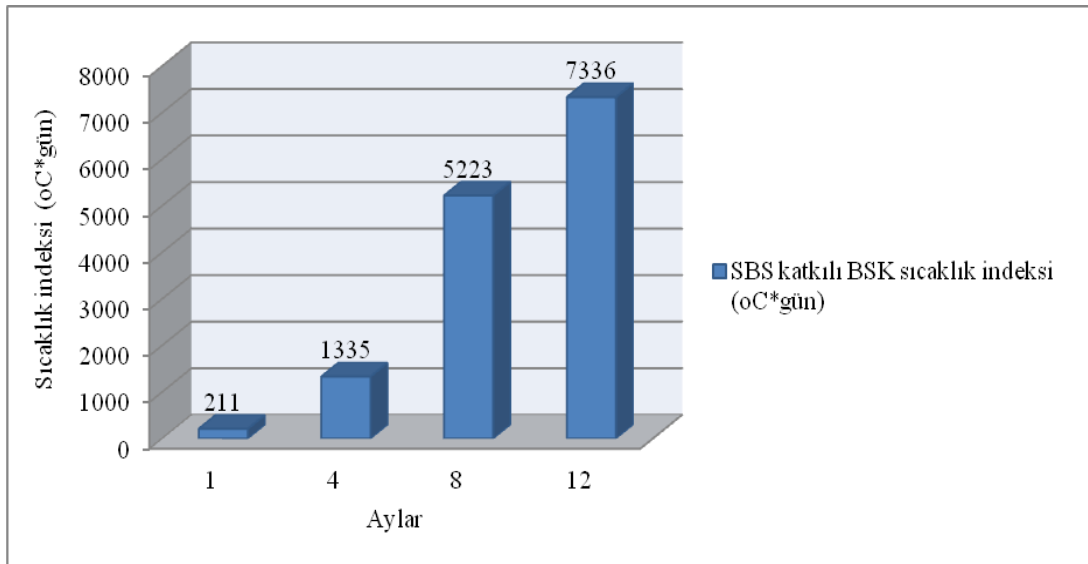
Karışım cinsi	SBS katkılı BSK			
Ölçüm yeri	Asfalt betonu kaplama aşınma tabakası sağ şerit			
Ölçüm zamanı	Aralık 2009	Nisan 2010	Ağustos 2010	Aralık 2010
Ölçüm periyodu	1. ay	4. ay	8. ay	12. ay
Ortalama Sıcaklık (°C)	5,79	16,99	28,63	27,03

SBS katkılı BSK ortalama yüzey sıcaklık değerlerinin belli periyotlardaki değişimi Şekil 7.53’te gösterilmiştir. Trafik ölçüm cihazıyla 1., 4., 8. ve 12. aylarda SBS katkılı BSK üzerindeki ortalama yüzey sıcaklıkları olarak en düşük sıcaklık değeri 5,79°C olarak 1. ay, en yüksek sıcaklık değeri 28,63°C ile 8. ayda elde edilmiştir. 12. ayda ortalama yüzey sıcaklık değeri ise 27,03°C olarak tespit edilmiş, dolayısıyla 8. aydan sonra ortalama yüzey sıcaklık değerinde düşüş görülmüştür.



Şekil 7.53. SBS katkılı BSK ortalama yüzey sıcaklıkları

Şekil 7.54'te SBS katkılı BSK yol yüzeyi sıcaklık değerlerinin gün sayısı toplamı kümülatif olarak belirlenip, sıcaklık indeksi sayısı ve toplam sıcaklık indeksi sayısı bir yıllık süre zarfındaki numunelerin alındığı zaman periyotlarında tespit edilmiştir. Sıcaklık indeksi değeri 1. ayda 211°C.gün, 4. ayda 1335°C.gün, 8. ayda 5223°C.gün ve 12. ayda ise 7336°C.gün olarak hesaplanmıştır.



Şekil 7.54. SBS katkılı BSK sıcaklık indeksleri

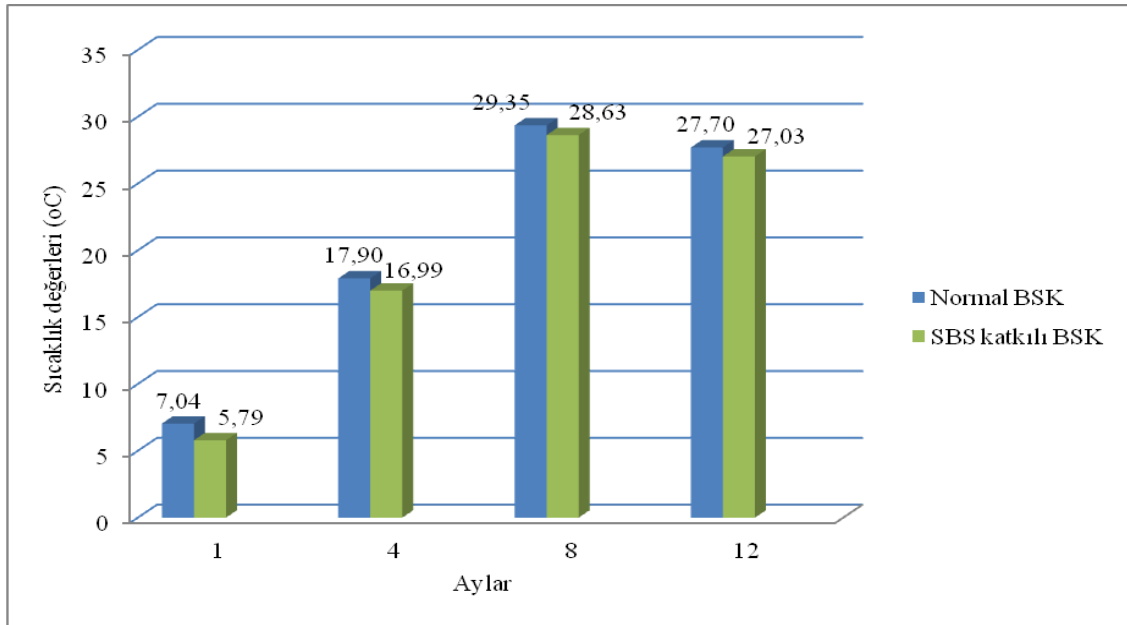
7.2.2.9. Katkısız ve SBS Katkılı BSK Yüzey Sıcaklık Ölçüm Değerlerinin Karşılaştırılması

Katkılı ve SBS katkılı BSK ortalama yüzey sıcaklıklarının değerleri Tablo 7.36'da karşılaştırılmıştır. Bir yıllık süre zarfındaki aylık değişimleri arasındaki fark bakımından 1. ayda normal BSK yüzey sıcaklıkları 1,25°C daha yüksek ölçülmüştür. 4. ayda bu fark 0,91°C, 8. ayda 0,72°C, 12. ayda 0,67°C olarak katkısız BSK ortalama yüzey sıcaklıkları SBS katkılı BSK ortalama yüzey sıcaklıklarına göre yüksek değerde elde edilmiştir.

Tablo 7.36. Katkılı ve katkısız BSK ortalama sıcaklık değişimleri

Aylar	Normal BSK sıcaklık ortalaması (°C)	SBS katkılı BSK sıcaklık ortalaması (°C)
1	7,04	5,79
4	17,90	16,99
8	29,35	28,63
12	27,70	27,03

Şekil 7.55'te katkısız BSK ortalama yüzey sıcaklıklarında 8. aya kadar 22,31°C'ye kadar artış görülmüş, 12. ayda ise ortalama sıcaklık miktarındaki artış 20,66°C'ye düşmüştür. SBS katkılı BSK ortalama yüzey sıcaklıklarında ise 8. aya kadar 22,84°C'ye kadar artış görülmüş, 12. ayda ise artış 21,24°C'ye düşmüştür.



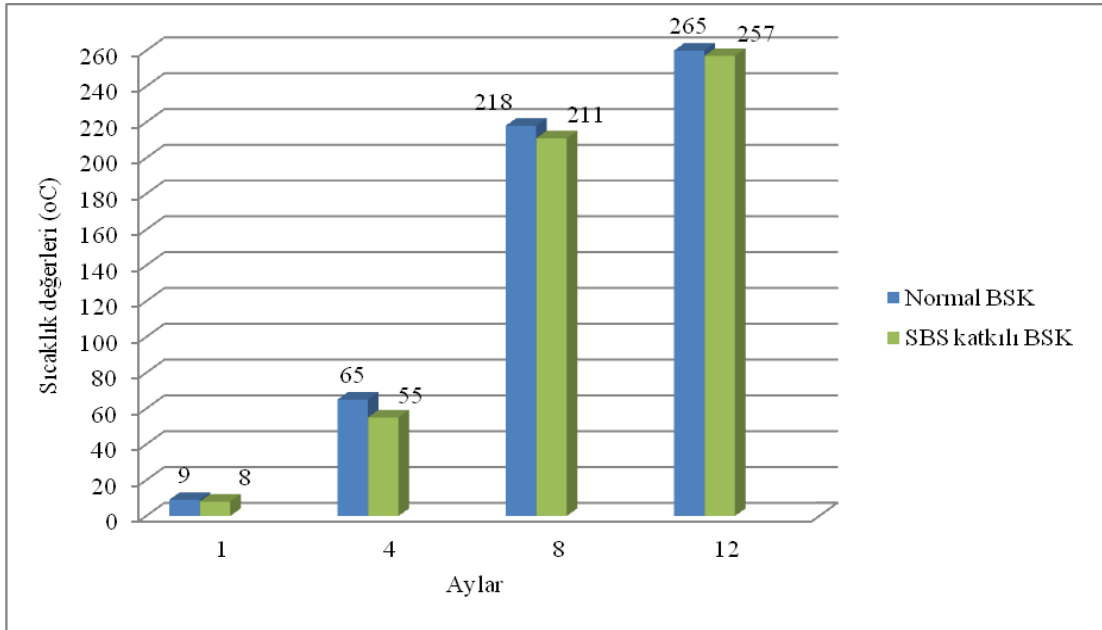
Şekil 7.55. Katkılı ve katkısız BSK ortalama yüzey sıcaklık değeri karşılaştırması

Tablo 7.37’de yıllık ortalama yüzey sıcaklık değerlerinin kümülatif değişimleri katkısız BSK yüzeylerinde 1. ayda 9°C olup, 12. ayda 265°C olarak tespit edilmiştir. SBS katkılı BSK yüzeylerinde ise 1. ayda 8°C olarak tespit edilen kümülatif sıcaklık değişimi 12. ayda 257°C’ye çıkmıştır.

Tablo 7.37. Katkısız ve SBS katkılı BSK yüzey kümülatif sıcaklık değişimleri karşılaştırılması

Aylar	Katkısız BSK kümülatif sıcaklık (°C)	SBS katkılı BSK kümülatif sıcaklık (°C)
1	9	8
4	65	55
8	218	211
12	265	257

Şekil 7.56’da 1. ayda farklı BSK tipleri arasındaki sıcaklık farkı 1°C iken 12. ayda ise fark 8°C olarak elde edilmiştir. En büyük sıcaklık değişimleri arasındaki fark 4. ayda 10°C olarak görülmüştür.



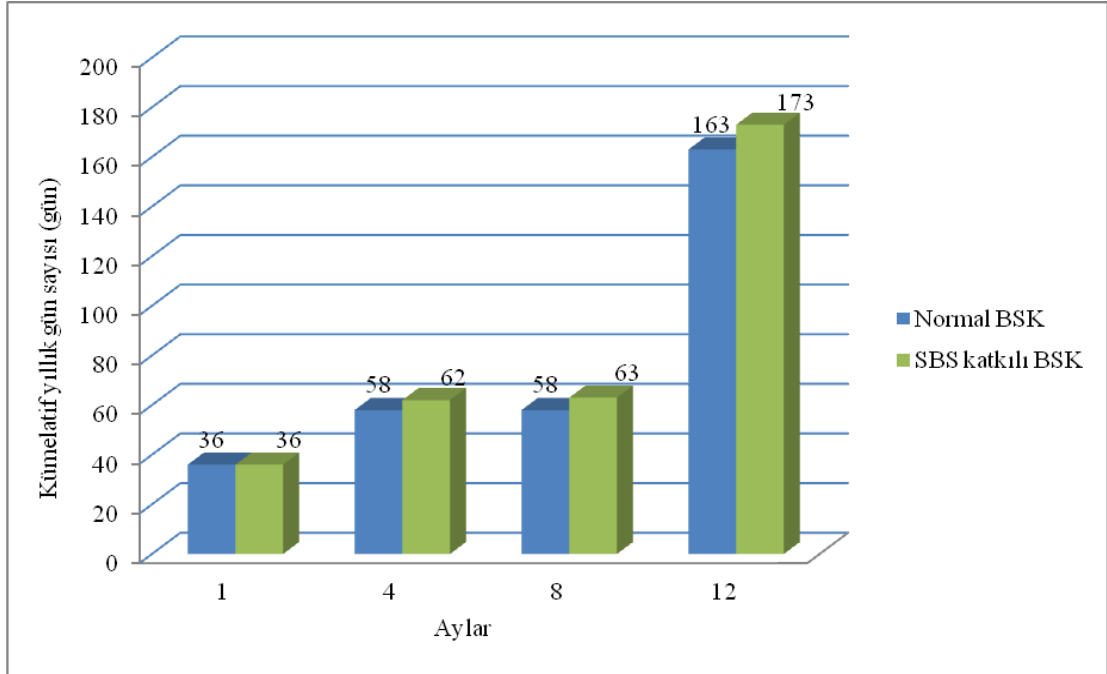
Şekil 7.56. Katkılı ve katkısız BSK kümülatif yüzey sıcaklık değeri karşılaştırması

Katkısız ve SBS katkılı BSK yüzeyi kümülatif sıcaklık değerleri bakımından 0°C ve 25°C’ye eşit ve üzerindeki sıcaklıklara ait gün sayısı Tablo 7.38’de karşılaştırılmıştır.

Tablo 7.38. Katkılı ve katkısız BSK yüzeyi yıllık kümülatif sıcaklık gün sayısı

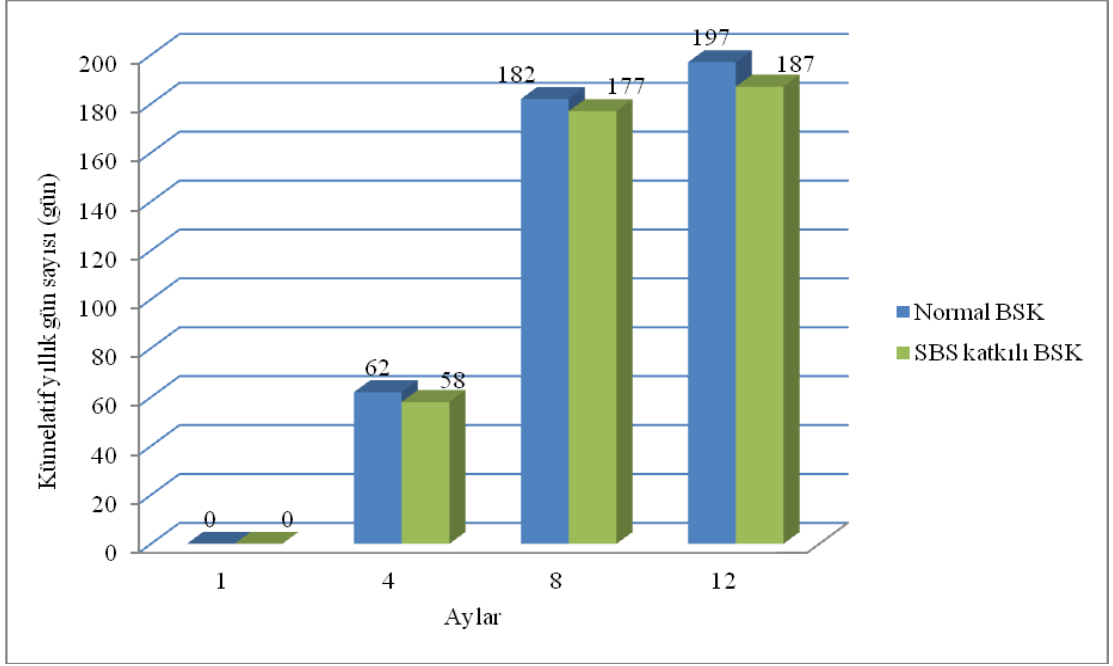
Aylar	Yıllık Kümülatif Sıcaklık Gün Sayısı			
	0 °C $\geq$		25 °C $\geq$	
	Katkısız BSK	SBS Katkılı BSK	Katkısız BSK	SBS Katkılı BSK
1	36	36	0	0
4	58	62	62	58
8	58	63	182	177
12	163	173	197	187

Katkısız ve SBS katkılı BSK yüzeyi 0°C ile 25°C ve üzeri yıllık kümülatif gün sayıları sırasıyla Şekil 7.57 ve Şekil 7.58’de gösterilmiştir.



Şekil 7.57. Katkısız ve SBS katkılı BSK yüzeyi 0 °C ve üzeri yıllık kümülatif gün sayısı

Şekil 7.57’de 0°C ve üzerindeki sıcaklıklarda yıllık kümülatif gün sayısının aylık periyotlardaki değerlerine bakıldığında, katkılı ve katkısız BSK gün sayısı 1. ayda 36 gün olarak ölçülmüştür. 12. ayda katkısız BSK gün sayısı 163 gün, SBS katkılı BSK gün sayısı ise 173 gün olarak tespit edilmiş, değerlerin birbirine yakın olduğu görülmüştür.



Şekil 7.58. Katkısız ve SBS katkılı BSK yüzeyi 25 °C ve üzeri yıllık kümülatif gün sayısı

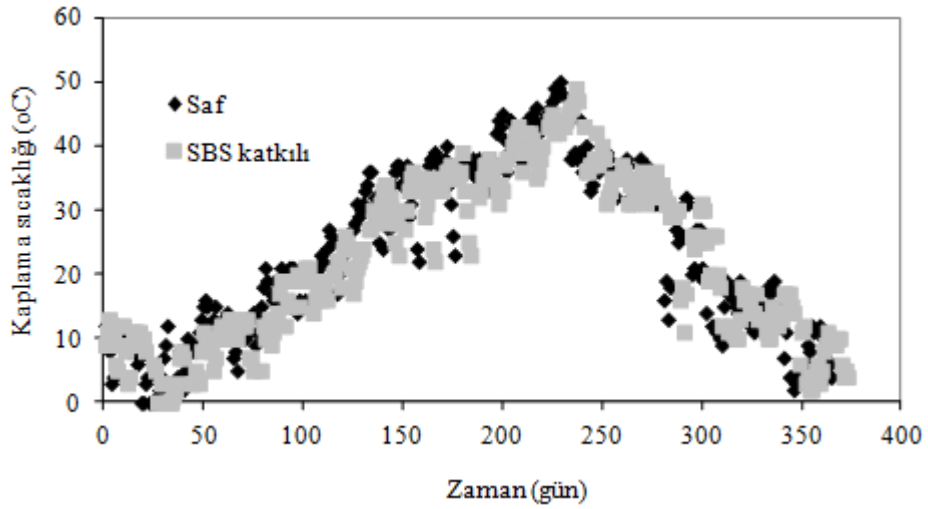
Şekil 7.58 incelendiğinde, 25°C ve üzerindeki yüzey sıcaklıkları ilk ölçüm yapılan Aralık ayı döneminde görülmemiştir. 12. ayda katkısız BSK yüzeyindeki 25°C ve üzeri sıcaklık kümülatif gün sayısı 197 gün, SBS katkılılarda ise 187 gün olarak tespit edilmiş ve değerlerin birbirine yakın olduğu görülmüştür.

Hava sıcaklığı indeksi değerleri Tablo 7.39’da verilmiştir.

Tablo 7.39. Hava sıcaklık indeksi değerleri

Aylar	Sıcaklık İndeksi (°C*gün)
1	163
4	1337
8	5352
12	7586

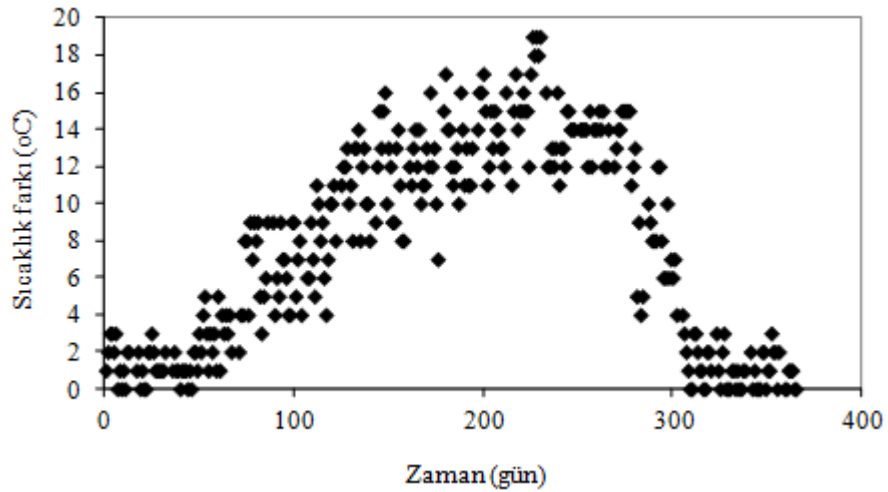
Şekil 7.59’da bir yıllık zaman diliminde (ocak ayı başı – aralık ayı sonu) saf ve katkılı kaplama kesimlerinde yapılan sıcaklık ölçümlerinin zamanla değişimi verilmiştir.



Şekil 7.59. Kaplama sıcaklığının zamanla değişimi

Şekil 7.59'dan görüldüğü üzere 8. ayın (240.gün) sonuna kadar katkılı kaplama kesiminin sıcaklığı katkısızdan 1-2°C daha düşük, Ağustos Aralık ayları arasında ise hemen hemen aynı sıcaklık değerlerindedirler. SBS katkısının kaplamanın ilk dönemlerinde ve hava sıcaklıklarının yüksek olması durumunda ısınma özelliklerini çok az oranda etkileyebileceği görülmüştür.

Şekil 7.60'ta ortalama hava sıcaklıkları ile kaplama sıcaklıkları arasındaki fark, bir yıllık zaman dilimi için verilmiştir.



Şekil 7.60. Kaplama ve hava sıcaklık farkının zamanla değişimi

Şekil 7.60'ta Ağustos ayı ortasında ortalama hava sıcaklığı 32°C, kaplama sıcaklığı ise 50°C olarak ölçülmüştür. Bitümlü karışımların ısıyı absorbe ederek bünyesinde

tutmasından dolayı ısı kapasiteleri yüksek olmaktadır. Laboratuvarında yapılan deneyler kısa sürede ve kontrollü bir sıcaklık ortamında yapıldığından hava sıcaklığı ile karışım sıcaklığı birbirinden çok farklı olmamakta, arazide ise kaplama sıcaklığı hava sıcaklığında %56 daha fazla olabilmektedir.

7.2.2.10. Katkısız ve SBS Katkılı BSK Yol Yüzeyi Taşıt Hız Değişimleri

Katkısız ve SBS katkı BSK yol yüzeylerinde trafik ölçüm cihazlarıyla yapılan sayımlarda, taşıt hızlarına bağlı taşıt sayıları ve bir yıllık zaman periyotlarındaki ortalama hız değerleri tespit edilmiştir.

Katkısız asfalt betonu kaplamadaki değişik hızlara sahip taşıt sayıları Tablo 7.40'da karşılaştırılmış ve belli periyotlardaki ortalama hız değerleri ile en yüksek ortalama hız değerleri Tablo 7.41'de gösterilmiştir.

Tablo 7.40'da görüldüğü üzere, katkısız BSK yol yüzeylerinde taşıtların en az yarısı 19-31km/saat hız aralıklarında ve daha düşük hızlara sahiptir. Katkısız BSK yol yüzeyinde 90-100km/saat ve üzeri hızlara sahip taşıt sayısı görülmemiş, en fazla taşıt sayısı 20-29km/saat hızlarında tespit edilmiştir.

Tablo 7.40. Katkısız BSK'daki değişik hızlara sahip taşıt trafiği sayısı

Aylar	Hız Limiti (km/s)	≤ 19	20-29	30-39	40-49	50-59	60-69	70-79	80-89	90-99	100≥
Aralık	Taşıt sayısı	365	528	380	241	90	38	27	8	-	-
Ocak		283	408	294	187	70	29	21	6	-	-
Şubat		290	331	266	155	75	27	-	-	-	-
Şubat Mart		206	235	189	110	53	19	-	-	-	-
Mart		285	344	220	148	55	15	-	-	-	-
Mart Nisan		236	260	210	93	68	31	-	-	-	-
Nisan Mayıs		200	222	177	96	42	28	-	-	-	-
Mayıs		220	243	175	100	45	28	-	-	-	-
Mayıs Haziran		268	276	221	137	50	26	-	-	-	-
Haziran		248	271	198	102	54	30	-	-	-	-
Haziran Temmuz		242	265	194	100	53	28	-	-	-	-
Temmuz Ağustos		232	255	186	96	51	27	-	-	-	-
Ağustos		209	238	192	111	54	19	-	-	-	-
Ağustos Eylül		252	275	201	103	55	31	-	-	-	-
Eylül		265	273	218	135	49	26	-	-	-	-
Eylül Ekim		270	278	222	138	50	27	-	-	-	-
Ekim		278	336	215	145	54	15	-	-	-	-
Kasım		288	348	223	150	56	15	-	-	-	-
Kasım Aralık		292	353	226	152	57	16	-	-	-	-
Aralık		279	337	214	146	55	16	-	-	-	-

Tablo 7.41. Katkısız BSK aylık ortalama taşıt trafiği hızları

Taşıt türü	Hafif ve ağır taşıt			
Aylar	1. ay	4. ay	8. ay	12. ay
En yüksek ortalama hız (km/sa)	29,86	29,26	29,43	29,50
Ortalama Hız (km/saat)	29,51			

Tablo 7.41'e göre tüm araç sınıflarında ortalama taşıt hızı yaklaşık 30km/saat olarak belirlenmiştir.

SBS katkılı BSK yol yüzeyindeki değişik hızlardaki taşıt trafiği sayısı Tablo 7.42'de verilmiş, belli periyotlardaki ortalama hız değerleri ile en yüksek ortalama hız değerleri Tablo 7.43'de gösterilmiştir.

Tablo 7.42. SBS katkılı BSK'daki değişik hızlara sahip taşıt trafiği sayısı

Aylar	Hız Limiti (km/s)	≤ 19	20-29	30-39	40-49	50-59	60-69	70-79	80-89	90-99	100≥
Aralık	Taşıt sayısı	469	617	581	272	75	31	-	-	-	-
Ocak		290	382	359	168	47	19	-	-	-	-
Şubat		309	406	226	133	40	15	-	-	-	-
Şubat Mart		261	344	191	112	34	13	-	-	-	-
Mart		255	359	224	85	16	17	-	-	-	-
Mart Nisan		297	398	234	123	30	9	-	-	-	-
Nisan Mayıs		229	350	305	77	21	9	-	-	-	-
Mayıs		255	293	266	114	18	14	-	-	-	-
Mayıs Haziran		279	363	318	141	35	14	-	-	-	-
Haziran		218	343	310	124	34	20	-	-	-	-
Haziran Temmuz		249	326	284	126	31	13	-	-	-	-
Temmuz Ağustos		228	347	302	79	23	10	-	-	-	-
Ağustos		257	341	188	110	36	12	-	-	-	-
Ağustos Eylül		216	338	317	126	37	19	-	-	-	-
Eylül		296	395	236	125	29	8	-	-	-	-
Eylül Ekim		298	397	232	124	32	9	-	-	-	-
Ekim		300	394	219	129	39	15	-	-	-	-
Kasım		299	401	236	124	31	9				
Kasım Aralık		271	353	309	137	34	13	-	-	-	-
Aralık		298	400	235	124	30	10	-	-	-	-

Tablo 7.43. SBS katkılı BSK aylık ortalama taşıt trafiği hızları

Taşıt türü	Hafif ve ağır taşıt			
Aylar	1. ay	4. ay	8. ay	12. ay
En yüksek ortalama hız (km/sa)	27,59	27,35	27,39	27,40
Ortalama Hız (km/saat)	27,43			

Tablolar incelendiğinde, SBS katkılı BSK yol yüzeylerindeki taşıtların belli periyotlardaki hızları en az yarısı 20-30km/saat hız aralıklarında ve daha düşük hızlara sahiptir. Tüm araç sınıflarında ortalama taşıt hızı yaklaşık 27km/saat olarak tespit edilmiştir. Hız değeri olarak katkısız BSK yol yüzeyinde 70km/saat ve üzeri hızlara sahip taşıt sayısı görülmemiştir.

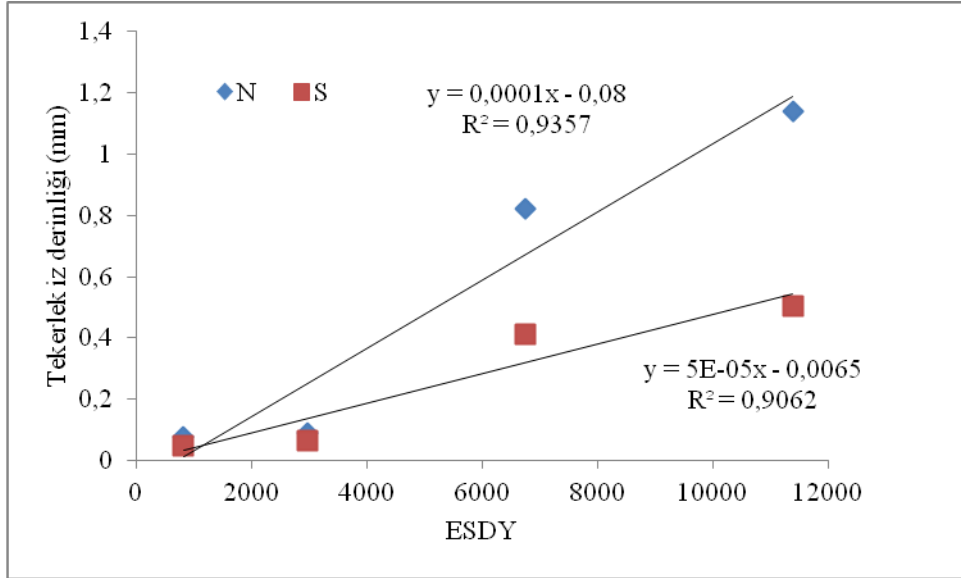
7.2.2.11. Arazi Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması

Saf ve SBS katkılı asfalt betonu kaplamalar yüzeyinde belli periyotlarda tespit edilen arazi deneylerinden; sıkıştırma yüzdesi tayini, tekerlek izi ölçümleri, yüzey sertliği dayanımı, sıcaklık ve taşıt sayıları değerlerinin karşılaştırılması yapılarak aralarındaki ilişkiler araştırılmıştır.

Arazi deneyi parametrelerinin karşılaştırması Şekil 7.61-Şekil 7.64'te gösterilmiştir.

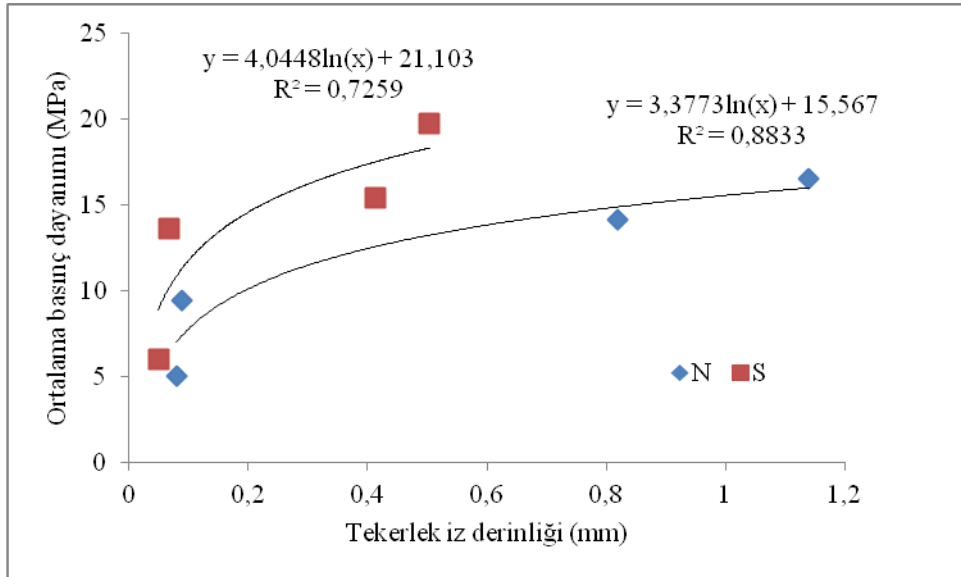
Normal karışımların (N) ve SBS katkılı karışımların (S) tekerlek izi derinliği- eşdeğer standart dingil yükü sayısı, tekerlek izi derinliği-ortalama basınç dayanımı, tekerlek izi derinliği-sıkıştırma derecesi, sıkıştırma derecesi-ortalama basınç dayanımı arasındaki ilişkiler grafiksel olarak belirtilmiştir. Grafiklerden denklem takımları ve belirtme katsayıları (R^2) saptanmıştır.

Belirtme katsayısı, değişkenlerin yönü ve etkileşimlerin nasıl olduğu hakkında bilgi vermektedir. Belirtme katsayısı -1 ile +1 arasında değişen değerler almaktadır. Katsayı, etkileşimin olmadığı durumda 0, tam ve kuvvetli bir etkileşim varsa 1, ters yönlü ve tam bir etkileşim varsa -1 değerini almaktadır. Belirtme katsayısının yorumunu, tam değerler dışında ara değerler için yapmak oldukça güçtür. Ara değerler için katsayı değerlendirirken, örnek gözlem sayısı (n) oldukça önemlidir. Çok fazla gözleme dayanan değerlendirmelerde 0,25'e kadar düşmüş bir belirtme katsayısı bile anlamlı sayılabilmektedir. Fakat az sayıda, 10-15 gözleme dayanan değerlendirmelerde belirtme katsayısının 0.71 üstünde olması beklenir. Ana kütleye göre normal sayılacak kadar bir gözlem sayısı alınarak bakılmış gözlem grupları için belirtme katsayısı genellikle, 0-0,49 arasında ise zayıf, 0,5-0,74 arasında ise orta derecede, 0,75-1 arasında ise kuvvetli ilişki vardır denilmektedir [209,222].



Şekil 7.61. Tekerlek izi-ESDY ilişkisi

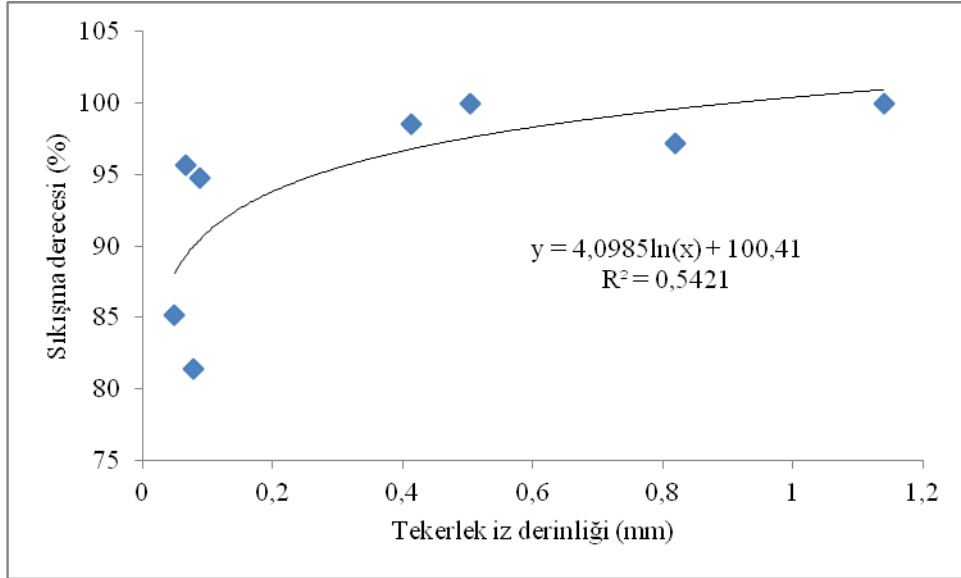
Şekil 7.61'e göre, tekerlek izi ve ESDY arasında belirtme katsayısı bakımından kuvvetli bir ilişkinin olduğu görülmektedir. Kaplama tabakalarının zaman ilerledikçe tekerlek izi derinliklerinde meydana gelen artışın, maruz kalınan toplam ESDY ile lineer olarak arttığı tespit edilmiştir.



Şekil 7.62. Tekerlek izi-ortalama basınç dayanımı ilişkisi

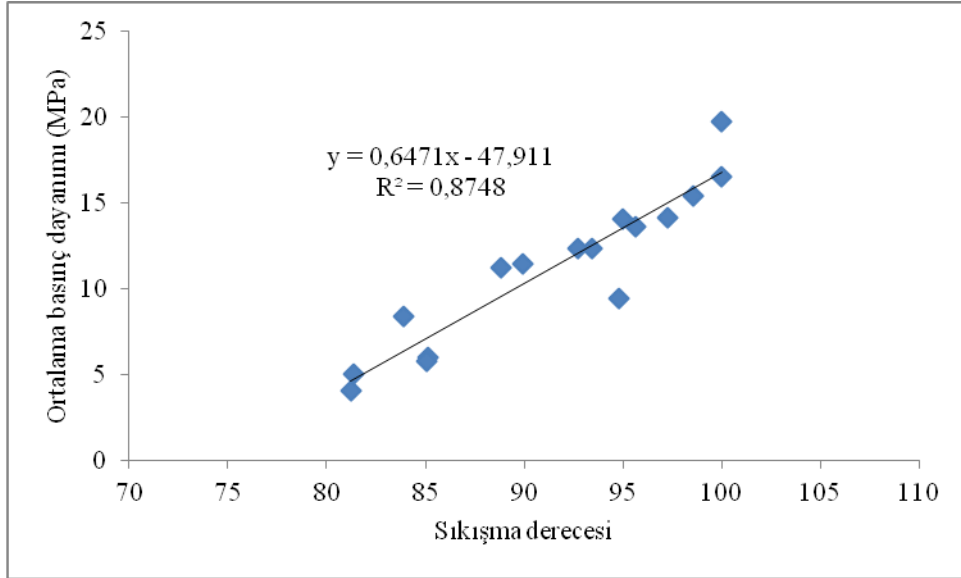
Şekil 7.62 incelendiğinde, tekerlek izi derinliği artışıyla ortalama basınç dayanımlarının arttığı, bu oranın katkılı kaplama tabakasında daha büyük olduğu görülmektedir. Ortalama

basınç dayanımı ile tekerlek izi derinliği arasında eğilim çizgisi denklemi üstel fonksiyon şeklindedir. Bağımlı değişkenlere ait parametreler arasında belirtme katsayısı değeri 1'e yakın olduğundan SBS katkılı kaplamada orta derecede, katkısız kaplama tabakasında ise kuvvetli bir ilişki mevcuttur.



Şekil 7.63. Tekerlek izi-sıkıştırma derecesi ilişkisi

Şekil 7.63'te, tekerlek izi derinliği artışıyla sıkıştırma derecesinin arttığı ve ilk zamanlardaki sıkıştırma derecesi artış oranının daha fazla olduğu görülmüştür. Eğilim çizgisi denklemi üstel fonksiyon şeklindedir. Bağımlı değişkenlere ait parametreler arasında belirtme katsayısı değeri 1'e yakın olduğundan orta derecede bir ilişki bulunmaktadır.



Şekil 7.64. Sıkıştırma derecesi-ortalama basınç dayanımı ilişkisi

Şekil 7.64’te görüldüğü üzere, kaplamanın sıkıştırma derecesindeki artışla ortalama basınç dayanımının arttığı, dolayısıyla sıkıştırma derecesi ve ortalama basınç dayanımı arasında yüksek bir belirtme katsayısı ile doğrusal bir ilişkinin olduğu tespit edilmiştir.

7.2.3. BSK Karot Numuneleri Hacimsel Deney Sonuçları

Katkılı ve katkısız BSK yol yüzeylerinde yol kenarı ve taşıt tekerlek geçiş bölgelerinde belli periyotlarda karot cihazıyla temin edilen karot numuneleri, uygun boyuta getirilerek, Marshall briketleri elde edilmiş ve laboratuvar ortamında hacimsel parametreler tespit edilmiştir.

Deneyisel çalışmalarda karışıklığa neden olmaması için Marshall deneyi uygulanan karot numunelerin isimlendirmesi Tablo 7.44’te gösterilmiştir.

Tablo 7.44. Marshall deneylerinde kullanılan karot numunelerinin isimlendirilmesi

Karışım Türü	İsimlendirme	Kısaltma
Katkısız yol kenarı park alanı karot numuneleri	Katkısız yol kenar karot	NK
SBS katkılı yol kenarı park alanı karot numuneleri	SBS katkılı yol kenar karot	SK
Katkısız tekerlek geçiş bölgesi karot numuneleri	Katkısız tekerlek geçiş karot	N
SBS katkılı tekerlek geçiş bölgesi karot numuneleri	SBS katkılı tekerlek geçiş karot	S

Marshall briketlerinin hacimsel özelliklerinde kaba agregâ %39,5, ince agregâ %51,7 ve filler %8,8'lik bir orana sahip olup, hacim özgül ağırlık bakımından kaba agregâ 2,682 gr/cm³, ince agregâ 2,673 gr/cm³ ve filler zahiri özgül ağırlığı 2,701 gr/cm³, saf bitümün 1,022 gr/cm³, SBS'li bitümün ise 1,017 gr/cm³ olarak belirlenmiştir. Numunelerin değişik periyotlardaki hacimsel parametrelerini oluşturan özgül ağırlık değerleri, hava boşluğu, agregalar arası boşluk ve asfaltla dolu boşluk yüzdeleri elde edilmiştir.

Hacimsel verilere ilişkin değerler Tablo 7.45 - Tablo 7.48'de sunulmuştur.

Tablo 7.45. 1. ay hacimsel değerler

Numune	No	Wa	Kuru	Doygun	Suda	Gmb	Gmm	Vh	Vma	Vfa
N	1	4.95	1061.89	1074.62	606.74	2.270	2.490	8.83	19.28	54.17
	2	4.95	1056.88	1071.65	603.23	2.256	2.490	9.37	19.75	52.57
	3	4.95	1086.14	1096.57	619.32	2.276	2.490	8.58	19.06	54.96
	ort					2.267	2.490	8.929	19.362	53.899
NK	1	4.95	1103.43	1115.39	628.69	2.267	2.490	8.93	19.36	53.88
	2	4.95	1076.72	1090.92	622.03	2.296	2.490	7.76	18.33	57.66
	3	4.95	1085.19	1100.98	624.06	2.275	2.490	8.60	19.07	54.90
	ort					2.280	2.490	8.43	18.92	55.48
S	1	5.24	1064.78	1072.46	601	2.258	2.478	8.87	19.89	55.43
	2	5.24	1068.9	1074.24	602.04	2.264	2.478	8.66	19.71	56.07
	3	5.24	1106.87	1113.25	629.97	2.290	2.478	7.58	18.76	59.59
	ort					2.271	2.478	8.369	19.457	57.032
SK	1	5.24	1080.4	1083.05	606.68	2.268	2.478	8.48	19.56	56.62
	2	5.24	1054.68	1059.56	598.02	2.285	2.478	7.79	18.95	58.88
	3	5.24	1110.33	1115.84	630.23	2.286	2.478	7.74	18.90	59.06
	ort					2.280	2.478	8.004	19.136	58.188

Tablo 7.46. 4. ay hacimsel değerler

Numune	No	Wa	Kuru	Doygun	Suda	Gmb	Gmm	Vh	Vma	Vfa
N	1	4.95	1160.79	1167.3	654.77	2.265	2.490	9.03	19.45	53.59
	2	4.95	1171.21	1178.71	665.75	2.283	2.490	8.29	18.79	55.91
	3	4.95	1169.33	1176.14	660.34	2.267	2.490	8.94	19.37	53.86
	ort					2.272	2.490	8.749	19.203	54.453
NK	1	4.95	1170.33	1177.24	664.6	2.283	2.490	8.30	18.80	55.87
	2	4.95	1185.87	1196.82	679.15	2.291	2.490	7.98	18.52	56.91
	3	4.95	1165.54	1174.37	663.64	2.282	2.490	8.33	18.83	55.76
	ort					2.285	2.490	8.20	18.72	56.18
S	1	5.24	1102.01	1105.37	621.85	2.279	2.478	8.03	19.16	58.08
	2	5.24	1087.54	1089.67	615.01	2.291	2.478	7.55	18.73	59.72
	3	5.24	1107.5	1109.84	626.3	2.290	2.478	7.58	18.76	59.60
	ort					2.287	2.478	7.720	18.886	59.132
SK	1	5.24	1082.99	1085.53	611.91	2.287	2.478	7.73	18.90	59.08
	2	5.24	1082.68	1084.59	609.3	2.278	2.478	8.08	19.20	57.92
	3	5.24	1116.55	1117.92	631.99	2.298	2.478	7.28	18.50	60.64
	ort					2.287	2.478	7.699	18.867	59.213

Tablo 7.47. 8. ay hacimsel değerler

Numune	No	Wa	Kuru	Doygun	Suda	Gmb	Gmm	Vh	Vma	Vfa
N	1	4.95	1099.77	1105.85	622.76	2.277	2.490	8.56	19.03	55.05
	2	4.95	1089.74	1097.49	618.88	2.277	2.490	8.54	19.02	55.09
	3	4.95	1099.87	1103.58	620.62	2.277	2.490	8.52	19.00	55.15
	ort					2.277	2.490	8.539	19.017	55.096
NK	1	4.95	1102.51	1112.72	626.82	2.269	2.490	8.86	19.30	54.10
	2	4.95	1125.51	1133.25	641.35	2.288	2.490	8.09	18.62	56.55
	3	4.95	1109.16	1118.9	633.5	2.285	2.490	8.21	18.73	56.15
	ort					2.281	2.490	8.39	18.88	55.60
S	1	5.24	1201.58	1207.07	685.08	2.302	2.478	7.11	18.35	61.24
	2	5.24	1185.43	1190.97	673.12	2.289	2.478	7.63	18.81	59.43
	3	5.24	1159.42	1164.56	655.14	2.276	2.478	8.16	19.27	57.65
	ort					2.289	2.478	7.635	18.812	59.441
SK	1	5.24	1201.55	1206.88	684.57	2.300	2.478	7.17	18.41	61.03
	2	5.24	1174.9	1182.03	668.56	2.288	2.478	7.67	18.84	59.29
	3	5.24	1212.64	1215.95	688.1	2.297	2.478	7.30	18.52	60.58
	ort					2.295	2.478	7.381	18.588	60.299

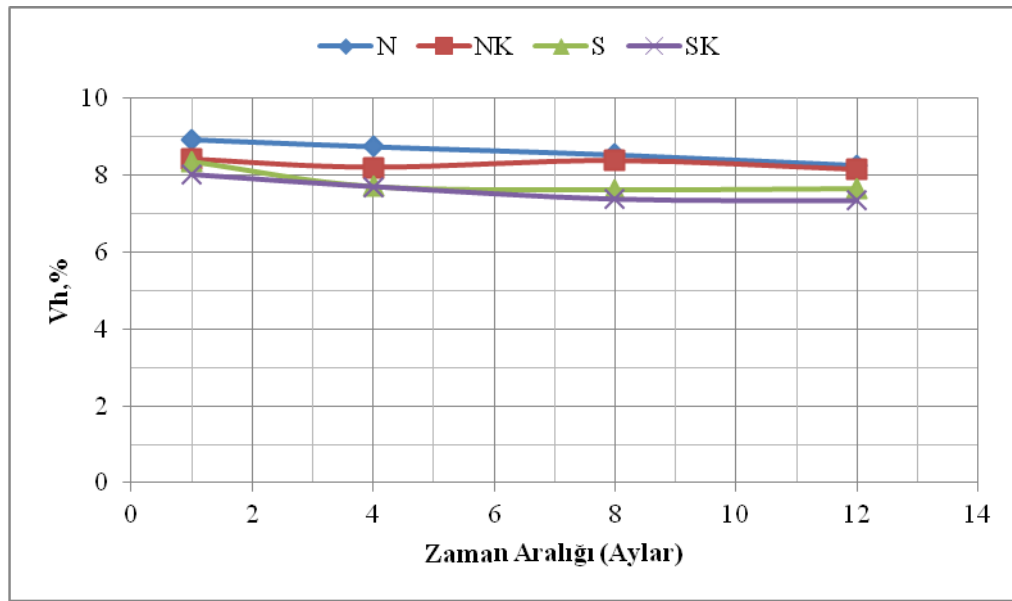
Tablo 7.48. 12. ay hacimsel değerler

Numune	No	Wa	Kuru	Doygun	Suda	Gmb	Gmm	Vh	Vma	Vfa
N	1	4.95	1083.65	1092.27	618.6	2.288	2.490	8.10	18.63	56.51
	2	4.95	1118.59	1130.81	640.75	2.283	2.490	8.31	18.82	55.82
	3	4.95	1117.45	1127.67	637.73	2.281	2.490	8.38	18.88	55.59
	ort					2.284	2.490	8.27	18.78	55.97
NK	1	4.95	1102.65	1115.89	634.56	2.291	2.490	7.98	18.52	56.91
	2	4.95	1108.03	1122	635.65	2.278	2.490	8.49	18.97	55.27
	3	4.95	1105.17	1117.79	635.53	2.292	2.490	7.95	18.49	57.02
	ort					2.287	2.490	8.138	18.662	56.401
S	1	5.24	1105.16	1108.88	624.13	2.280	2.478	8.00	19.14	58.17
	2	5.24	1130.3	1133.37	642.51	2.303	2.478	7.08	18.33	61.35
	3	5.24	1082.1	1085.12	611	2.282	2.478	7.90	19.05	58.50
	ort					2.288	2.478	7.664	18.837	59.341
SK	1	5.24	1124.7	1126.4	637.61	2.301	2.478	7.15	18.39	61.10
	2	5.24	1118.5	1120.26	634.16	2.301	2.478	7.15	18.39	61.10
	3	5.24	1116.92	1120.49	632.06	2.287	2.478	7.73	18.89	59.10
	ort					2.296	2.478	7.344	18.555	60.435

Bir yıllık süre zarfında aylık periyotlar bakımından; özgül ağırlık değerleri, hava boşluğu ve agregalar arası boşluk yüzdesi değerlerinin, hem yol kenarı hem de tekerlek geçiş bölgesi katkısız ve SBS katkılı kontrol numunelerinde azaldığı, asfaltla dolu boşluk yüzdesinin ise arttığı tespit edilmiştir. Tekerlek geçiş bölgelerindeki hacimsel parametrelerdeki değişimler, yol kenar bölgesine göre daha fazla çıkmıştır.

7.2.3.1. BSK Karot Numuneleri Boşluk Oranı Değişimleri

BSK karot numunelerinde bir yıllık süre zarfında boşluk hacmi değerinde meydana gelen değişimler katkılı ve katkısız numuneler için karşılaştırılmıştır. Karot numuneleriyle ilgili laboratuvar deneylerinden, aylık değişkenlere bağlı grafikler, denklem takımları ve belirtme katsayıları (R^2) saptanmıştır. Zamana bağlı hava boşluğu değişimleri Şekil 7.65'te gösterilmiş, boşluk hacmi değişimine bağlı fonksiyonlar ve R^2 değerleri Tablo 7.49'da verilmiştir.



Şekil 7.65. Zamana bağlı hava boşluğu değişimleri

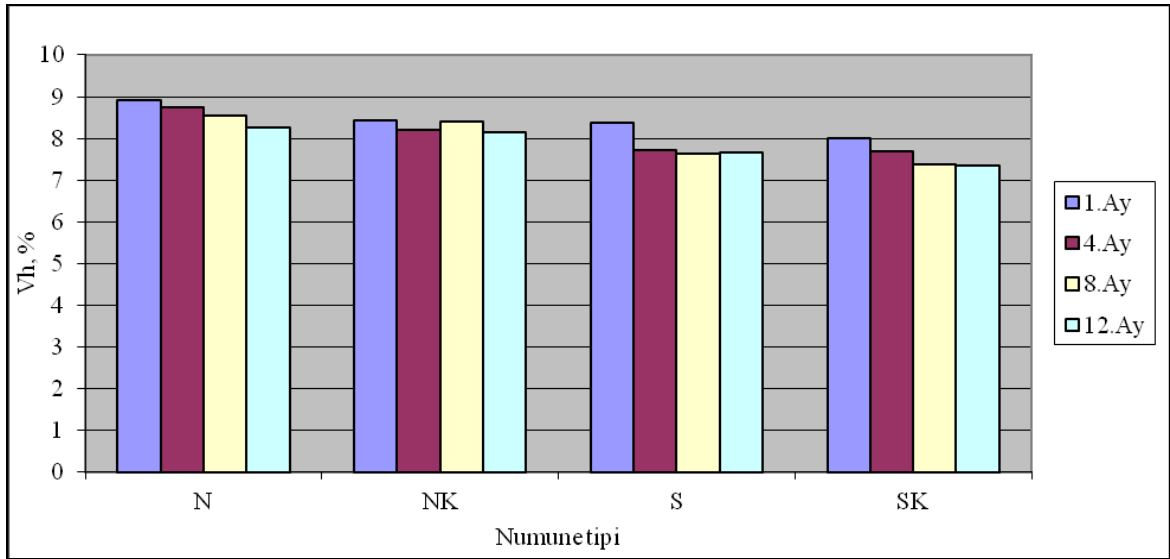
Şekil 7.65 incelendiğinde, boşluk hacimleri tüm BSK tiplerinde hemen hemen lineer bir azalma eğilimi göstermiştir. Fonksiyon türleri (üstel, doğrusal, logaritmik, polinom, üs) değiştiğinde R^2 katsayıları arasındaki fark az olmasından dolayı numune tipleri arasında karşılaştırma imkanı sağlamak amacıyla tüm numunelerin fonksiyon türü doğrusal olarak kabul edilmiştir ve karşılaştırılmıştır.

Tablo 7.49. Karot numunelerinin zamana bağılı boşluk hacmi değişim fonksiyonları ve belirtme katsayıları

Karot numunesi	Fonksiyon	R ²
N	$y = -0,0592x + 8,9915$	0,9975
NK	$y = -0,0179x + 8,4015$	0,3628
S	$y = -0,0564x + 8,1995$	0,596
SK	$y = -0,0611x + 7,9887$	0,8957

Tablo 7.49’da doğrusal denklem fonksiyonlarına ait N ve SK tipi numunelerin belirtme katsayısı değerleri, NK ve S karot numune değerlerine göre daha iyi sonuç vermiştir. En iyi sonuç N tipi numunelere ait fonksiyonlarda, en zayıf değer ise NK tipi numunelere ait fonksiyonlarda görülmüştür.

Karot numunelerinin tipine göre aylık değişim grafikleri Şekil 7.66’da gösterilmiştir.



Şekil 7.66. Karot numunelerine ait hava boşluk oranı değişimleri

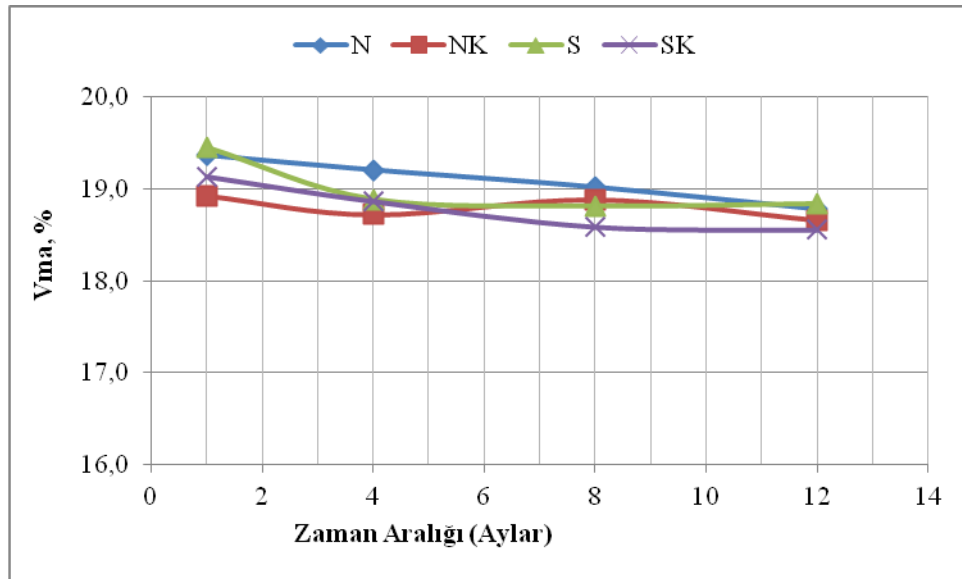
Şekil 7.66’dan anlaşılabacağı üzere, katkısız tekerlek geçiş karot numunelerinin hava boşluk oranlarının bir yıllık periyot zarfında azaldığı, katkısız yol kenar karot numunelerinin hava boşluk oranlarının ise 1. aydan 4. aya kadar azaldığı 8. ayda bir miktar arttığı, 12. ayda ise tekrar azaldığı görülmüştür. SBS katkılı tekerlek geçiş karot numunelerinin hava boşluk oranlarında 1. aydan 8. aya kadar azalma görüldüğü, 12. ayda ise bir miktar artışın olduğu, SBS katkılı yol kenar karot numunelerinin hava boşluk oranlarında ise bir yıllık periyot zarfında azalmaların olduğu görülmüştür. En büyük boşluk

oranı yüzdesi değeri katkısız tekerlek geçiş karot numunelerinde 1. ayda %8,539, en az boşluk oranı yüzdesi değeri ise 12. ayda SBS katkılı yol kenar karot numunelerinde %7,344 olarak tespit edilmiştir. Grafikten anlaşılabacağı üzere katkısız Marshall briketlerinin boşluk oranlarının, SBS katkılı Marshall briketlerine göre daha fazla olduğu görülmüştür. Katkısız numune tekerlek geçiş karot numunelerin boşluk oranları, katkısız yol kenar karot numunelerine göre daha fazla çıkmıştır. Benzer durum SBS katkılı numune tipleri karşılaştırılmasında da görülmüştür.

7.2.3.2. BSK Karot Numuneleri Agregalar Arası Boşluk Oranı Değişimleri

BSK karot numunelerinde bir yıllık süre zarfında agregalar arası boşluk hacmi değerinde meydana gelen değişimler katkılı ve katkısız numuneler için Şekil 7.67’de karşılaştırılmış ve zaman içinde azalma eğilimi göstermiştir.

Şekil 7.67’de karşılaştırılan zamana bağlı agregalar arası boşluk hacmi değişimleri tüm numune tiplerinde doğrusal kabul edilmiştir. N ve SK tipi karot numunelerinde S ve SK tipine göre daha iyi lineer şekilde azalmaya benzer bir değişim görülmektedir.



Şekil 7.67. Zamana bağlı agregalar arası boşluk değişimleri

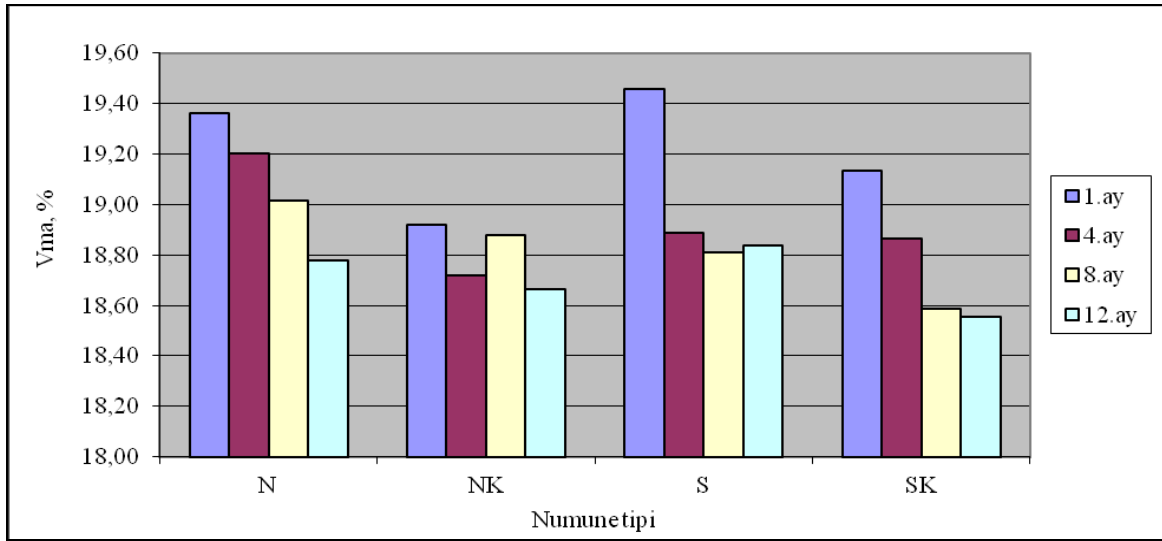
Tablo 7.50’de karot numune tiplerinin agregalar arası boşluk değişimi fonksiyonları ve belirtme katsayıları verilmiştir. Doğrusal denklem bakımından N ve SK tipi numunelerinin R^2 değerleri, NK ve S karot numune değerlerine göre daha iyi sonuç vermiştir. Numuneler

karşılaştırıldığında en iyi belirtme katsayısı değeri N tipi numunelere ait fonksiyonlarda, en kötü değer ise NK tipi numunelere ait fonksiyonlarda elde edilmiştir.

Tablo 7.50. Karot numunelerinin zamana bağlı agregalar arası boşluk hacmi değişim fonksiyonları ve belirtme katsayıları

Karot numunesi	Fonksiyon	R ²
N	$y = -0,0523x + 19,417$	0,9976
NK	$y = -0,0161x + 18,896$	0,3837
S	$y = -0,0496x + 19,308$	0,5957
SK	$y = -0,0537x + 19,122$	0,8958

Şekil 7.68’de karot numunelerine ait değişik periyotlardaki agregalar arası boşluk oranı değişimleri verilmiştir.



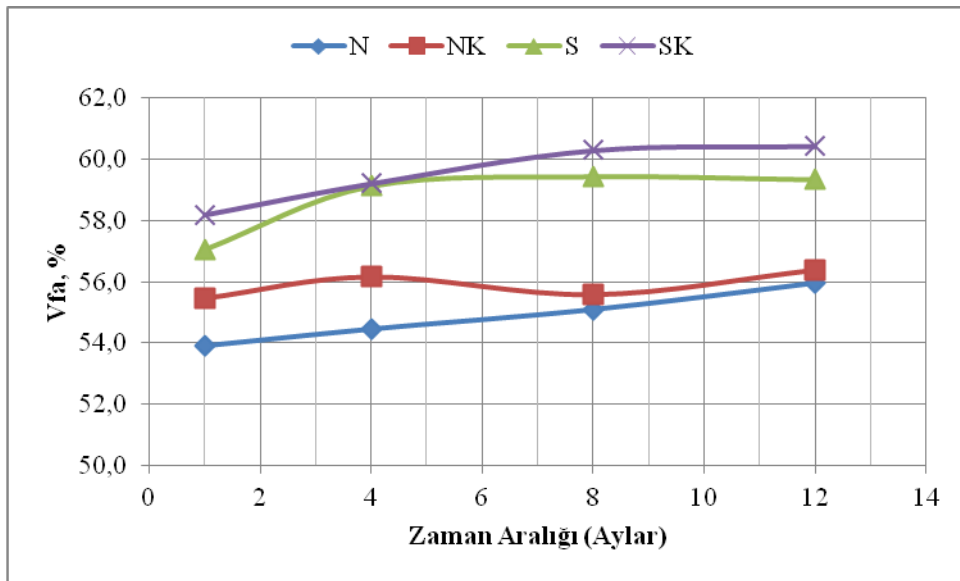
Şekil 7.68. Karot numunelerine ait agregalar arası boşluk oranı değişimleri

Şekil 7.68’e göre 4 farklı kesimden alınan 2 farklı tip tüm karot numunelerinde bir yıllık zaman periyodu bakımından agregalar arası boşluk oranlarında düşüşlerin olduğu görülmektedir. Katkısız tekerlek geçiş karot numunelerinin agregalar arası boşluk oranlarının bir yıllık periyot zarfında azaldığı, katkısız yol kenar karot numunelerinin agregalar arası boşluk oranlarının ise 1. aydan 4. aya kadar azaldığı 8. ayda bir miktar arttığı, 12. ayda ise tekrar azaldığı görülmüştür. SBS katkılı tekerlek geçiş karot numunelerinin agregalar arası boşluk oranlarında 1. aydan 8. aya kadar azalma görüldüğü,

12. ayda ise bir miktar artışın olduğu, SBS katkılı yol kenar karot numunelerinin agregalar arası boşluk oranlarında ise bir yıllık periyot zarfında azalmaların olduğu görülmüştür. Yıllık periyottaki zaman dilimleri değerlendirildiğinde; 1. ay agregalar arası boşluk oranı değerleri, SBS katkılı tekerlek geçiş karot numunelerinde diğer tip karot örneklerine göre daha büyük değerlerde olduğu tespit edilmiştir. En büyük agregalar arası boşluk oranı değeri katkılı tekerlek geçiş karot numunelerinde 1. ayda %19,457, en az agregalar arası boşluk oranı değeri ise 12. ayda SBS katkılı yol kenar karot numunelerinde %18,555 olarak tespit edilmiştir. Grafik incelendiğinde, Agregalar arası boşluk oranı yüzdesi 4. aydan itibaren katkısız tekerlek geçiş karot örneklerinde daha büyük değerlerde çıkmış ve 12. aya kadar devam etmiştir. 12. ayda SBS katkılı tekerlek geçiş karotlarında, katkısız tekerlek geçiş karotlarına göre daha fazla agregalar arası boşluk oranı gözlenmiştir. Katkısız ve SBS katkılı her iki tip tekerlek geçiş karot numunelerinin agregalar arası boşluk oranları, yol kenar karot numune değerlerine göre daha fazla çıkmıştır.

7.2.3.3. BSK Karot Numuneleri Asfaltla Dolu Boşluk Oranı Değişimleri

BSK karot numunelerinde asfaltla dolu boşluk hacmi değerinin zamanla değişimleri katkılı ve katkısız numuneler için Şekil 7.69'daki grafik incelendiğinde, artma eğiliminde olduğu görülmektedir. Tüm karot numune tiplerinin eğilim çizgisi denklemleri doğrusal olarak kabul edilmiştir.



Şekil 7.69. Zamana bağlı asfaltla dolu boşluk değişimleri

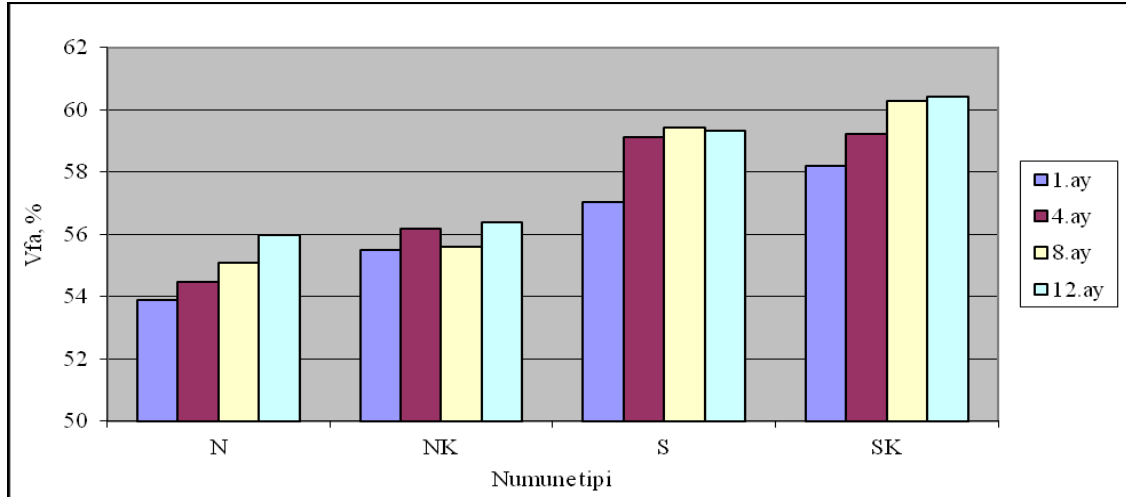
Karot numunelerinin asfaltla boşluk hacmi değişimlerinden elde edilen fonksiyonlar ve R^2 değerleri Tablo 7.51’de sunulmuştur.

Tablo 7.51. Karot numuneleri asfaltla dolu boşluk hacmi değişimlerine bağlı doğrusal fonksiyonlar ve belirtme katsayıları

Karot numunesi	Fonksiyon	R^2
N	$y = 0,1855x + 53,695$	0,9958
NK	$y = 0,0572x + 55,558$	0,3778
S	$y = 0,1857x + 57,576$	0,6043
SK	$y = 0,2081x + 58,233$	0,8992

Tablo 7.51’de numune tiplerinin lineer denklem fonksiyonları bakımından R^2 değerlerinin (0-1) arasında olduğu belirlenmiştir. Fonksiyonlara ait N ve SK tipi numunelerin R^2 değerleri, NK ve S karot numune değerlerine göre daha iyi sonuç vermiştir. En iyi R^2 değeri N tipi numunelere ait fonksiyonlarda, en zayıf değer ise NK tipi numunelere ait fonksiyonlarda görülmüştür.

Şekil 7.70’te karot numunelerine ait değişik periyotlardaki asfaltla dolu boşluk oranı karşılaştırılması grafiksel olarak sunulmuştur.



Şekil 7.70. Karot numunelerine ait asfaltla dolu boşluk oranı değişimleri

Şekil 7.70’te tüm karot numunelerinin bir yıllık zaman periyodu bakımından asfaltla dolu boşluk oranlarında artışların olduğu görülmektedir. Katkısız tekerlek geçiş karot numunelerinin asfaltla dolu boşluk oranlarının bir yıllık periyot zarfında arttığı, katkısız

yol kenar karot numunelerinin asfaltla dolu boşluk oranlarının ise 1. aydan 4. aya kadar arttığı, 8. ayda bir miktar azaldığı, 12. ayda ise tekrar arttığı görülmüştür. SBS katkılı tekerlek geçiş karot numunelerinin asfaltla dolu boşluk oranlarında 1. aydan 8. aya kadar artma görüldüğü, 12. ayda ise bir miktar azalışın olduğu, SBS katkılı yol kenar karot numunelerinin asfaltla dolu boşluk oranlarında ise bir yıllık periyot zarfında artışın olduğu görülmüştür. Katkısız ve SBS katkılı her iki tip yol kenar bölgesi karot numunelerinin asfaltla dolu boşluk oranları, tekerlek geçiş bölgesi karot numune değerlerine göre daha fazla çıkmıştır. Karot numuneleri arasında aylara göre en fazla asfaltla dolu boşluk oranı, 12. ay SBS katkılı yol kenarı karot numunelerinde %60,435, en az asfaltla dolu boşluk oranı değeri ise 1. ay katkısız tekerlek geçiş bölgesi karot numunelerinde %53,899 olarak tespit edilmiştir.

7.2.4. Kontrol ve Karot Numunelerine Ait Marshall Deneyi Uygulaması

Deneysel çalışmalarda karışıklığa neden olmaması için kontrol ve karot numunelerinde değerlendirme yapılırken isim kısaltması uygulanmıştır. Laboratuvar ortamında hazırlanan ve Marshall deneyi uygulanan kontrol numunelerinin isimlendirme ve kısaltmaları Tablo 7.52’de gösterilmiştir.

Tablo 7.52. Marshall deneylerinde kullanılan karışım numunelerinin isimlendirilmesi

Karışım Türü	İsimlendirme	Kısaltma
Katkısız temin edilen BSK numuneler	Katkısız kontrol	K
SBS katkılı temin edilen BSK numuneler	SBS katkılı Kontrol	KK

7.2.4.1. Laboratuvarda Hazırlanan Numunelerinin Marshall Deney Sonuçları

Marshall dizaynı yapılan saf ve modifiye bitüm içeren BSK karışımlarda kontrol amaçlı olarak plentten temin edilen ve uygulama sahasına getirilen optimum %4,95 saf bitüm içeren BSK ve optimum %5,24 modifiye bitüm içeren BSK karışımlarından temin edilerek, laboratuvar ortamında sıkıştırılıp Marshall briketleri hazırlanarak; indirekt çekme, indirekt çekme rijitlik modülü ve yorulma deneyleri yapılmıştır. Aynı deneyler arazide uygulanan saf ve SBS katkılı BSK kaplama tabakasından bir yıllık periyotta temin edilen karot numunelerinde de uygulanmıştır.

Saf ve SBS katkılı BSK numuneleri üzerinde uygulanan Marshall numunelerinden elde edilen hacimsel veri sonuçları Tablo 7.53, stabilite, akma ve stabilite/akma sonuçları Tablo 7.54 ve Tablo 7.55’te verilmiştir.

Tablo 7.53. Laboratuvarında hazırlanan normal ve SBS katkılı BSK kontrol numuneleri hacimsel verileri

Numune	No	Wa	Kuru	Doygun	Suda	Gmb	Gmm	Vh	Vma	Vfa
Katkısız kontrol	1	4.95	1207.46	1211.79	701.75	2.367	2.490	4.90	15.80	68.98
	2	4.95	1205.82	1210.74	701.02	2.366	2.490	4.98	15.86	68.63
	3	4.95	1205.65	1208.65	699.14	2.366	2.490	4.95	15.84	68.75
	ort					2.366	2.490	4.94	15.83	68.78
SBS katkılı kontrol	1	5.24	1201.12	1205.16	695.73	2.358	2.478	4.86	16.37	70.31
	2	5.24	1195.44	1198.83	692.76	2.362	2.478	4.68	16.22	71.13
	3	5.24	1198.85	1201.78	693.65	2.359	2.478	4.80	16.32	70.60
	ort					2.360	2.478	4.780	16.302	70.680

Tablo 7.54. Laboratuvarında hazırlanan katkısız numunelerin Marshall deney sonuçları

Numune tipi	No.	Numune yüksekliği (mm)				Stabilite (kN)	Akma (mm)	Düzeltilme faktörü	Düzeltilmiş stabilite (kN)	Stb/akma (kN/mm)
		h1	h2	h3	hort					
Katkısız kontrol	1	65	65,1	65,2	65,10	12,7	3,03	0,96	12,192	4,02
	2	64,9	65	65,1	65,00	11,8	3,81	0,962	11,3516	2,98
	3	65	65	65,1	65,03	12,1	3,47	0,962	11,6402	3,35
Ortalama						12,2	3,44		11,73	3,45

Tablo 7.55. Laboratuvarında hazırlanan SBS katkılı numunelerin Marshall deney sonuçları

Numune tipi	No.	Numune yüksekliği (mm)				Stabilite (kN)	Akma (mm)	Düzeltilme faktörü	Düzeltilmiş stabilite (kN)	Stb/akma (kN/mm)
		h1	h2	h3	hort					
SBS katkılı kontrol	1	65,1	64,9	65	65,00	18,9	2,51	0,962	18,1818	7,24
	2	65	65,1	65,1	65,07	18,7	2,58	0,962	17,9894	6,97
	3	64,9	65,2	65	65,03	18,6	2,33	0,962	17,8932	7,68
Ortalama						18,73	2,47		18,02	7,30

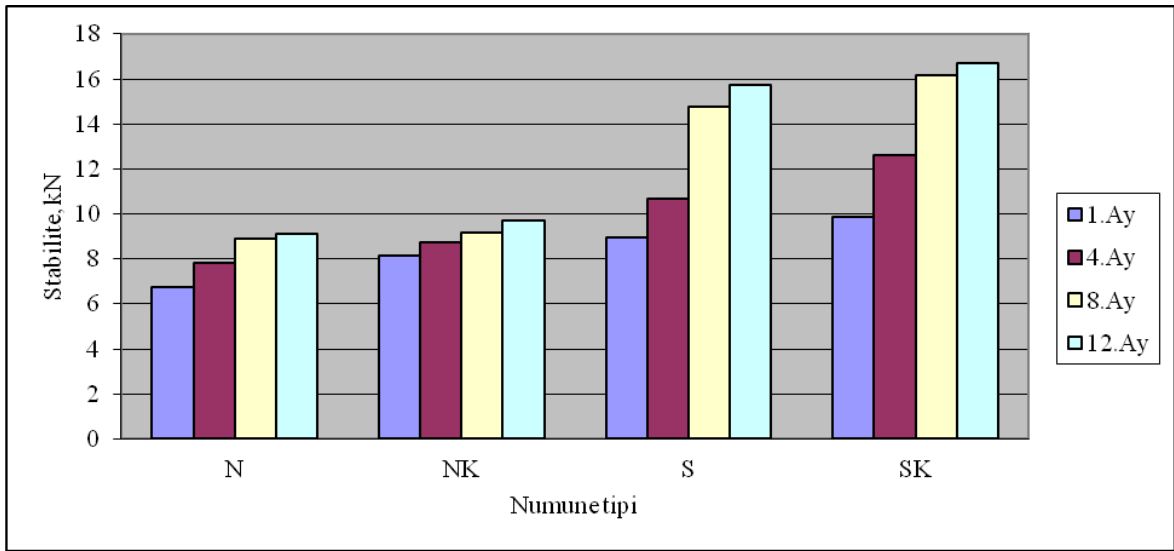
7.2.4.2. Karot Numunelerinin Marshall Deneyi Sonuçları

Saf ve SBS katkılı BSK’larla hazırlanan yol güzergahı üzerinden temin edilen yol kenarı saf (NK) ve SBS katkılı (SK) tipi karot numuneleri ile tekerlek geçiş bölgesi saf (N) ve SBS katkılı (S) tipi karot numuneleri üzerinde laboratuvarında yapılan Marshall deneylerinden elde edilen stabilite değerlerinin sonuçları Tablo 7.56’da verilmiştir.

Kullanılan bitüm tipi ve aylık değişimlere göre Marshall stabilite değerlerinin karşılaştırılması, Şekil 7.71 ve Şekil 7.72’de yapılmıştır.

Tablo 7.56. Karot numuneleri Marshall stabilite aylık toplam veriler

Numune tipi	Aylar	1. ay	4. ay	8. ay	12. ay
N	Stabilite (kN)	6,77	7,82	8,9	9,11
NK		8,13	8,73	9,19	9,7
S		8,93	10,7	14,76	15,74
SK		9,87	12,6	16,19	16,72

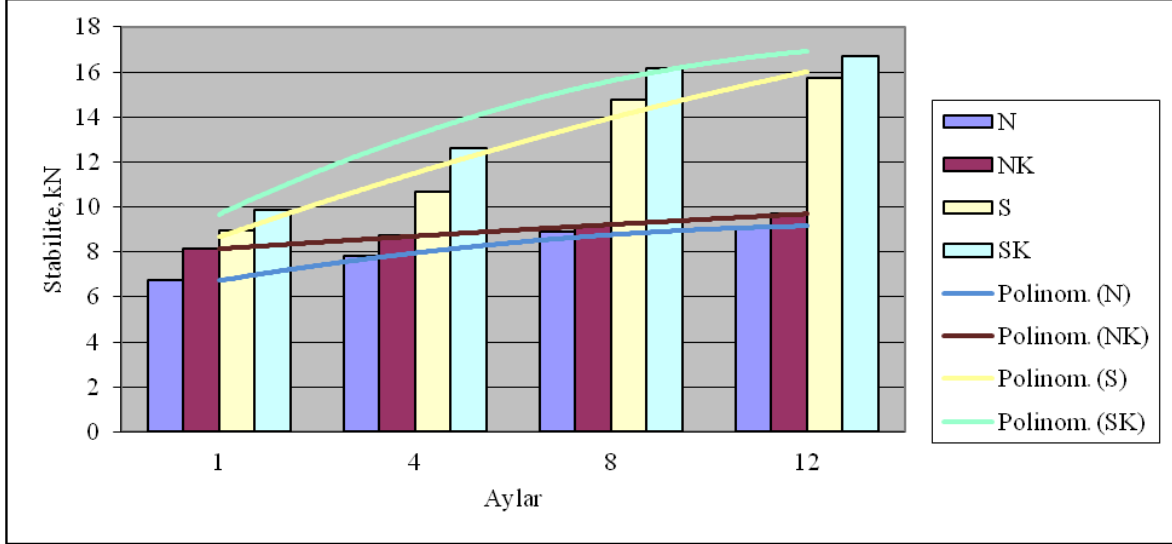


Şekil 7.71. Karot numuneleri Marshall stabilite değerlerinin numune tipine göre aylık değişimleri

Şekil 7.71’de, karot numunelerine ait stabilite değerleri bakımından katkılı BSK numunelerinin katkısız olanlara göre daha büyük değerde olduğu, aylık periyotlardaki artışla birlikte karot numunelerinin stabilite değerlerinin de artış meydana geldiği görülmektedir. NK tipi karot numunelerinin N tipine göre, SK tipi karot numunelerinin ise S tipindekilere göre daha büyük değerlerde olduğu gözlenmiştir. En düşük stabilite değeri 1. ay N tipinde 6,77 kN, en büyük stabilite değeri ise 12. ay SK tipi karot numunelerinden 16,72 kN olarak elde edilmiştir.

Şekil 7.72’de numunelerin stabilitelerinde zamanla meydana gelen değişimleri verilmiştir. Numunelerde zamanla meydana gelen oksidasyon neticesinde stabilitelerde önemli derecede artışlar olmuştur. SBS katkılı numunelerin stabiliteleri saf karışıma göre 1. ve 12. aylar arasında %24 ile %72 oranında artış göstermiştir. Kaplamanın

serilmesinden bir yıl sonra alınan numunelerin stabiliteleri ilk aydaki stabilite değerlerinden normal karışımlarda %34, SBS katkılı karışımlarda %76 oranında artmıştır.



Şekil 7.72. Karot numuneleri Marshall stabilite değerlerinin aylık değişimleri ve eğilim çizgileri

Karot numune tiplerinin fonksiyon tipleri ve R^2 katsayıları, Tablo 7.57’de sunulmuştur. Tablo 7.57’ye bakıldığında, bağımsız değişken olan aylık periyotlardaki bağımlı değişken stabilite parametrelerinden elde edilen fonksiyonlara ait R^2 değerlerinin 1,0’e yakın olduğu, dolayısıyla içsel bir bağımlılığın ve kuvvetli bir ilişkinin olduğu görülmektedir.

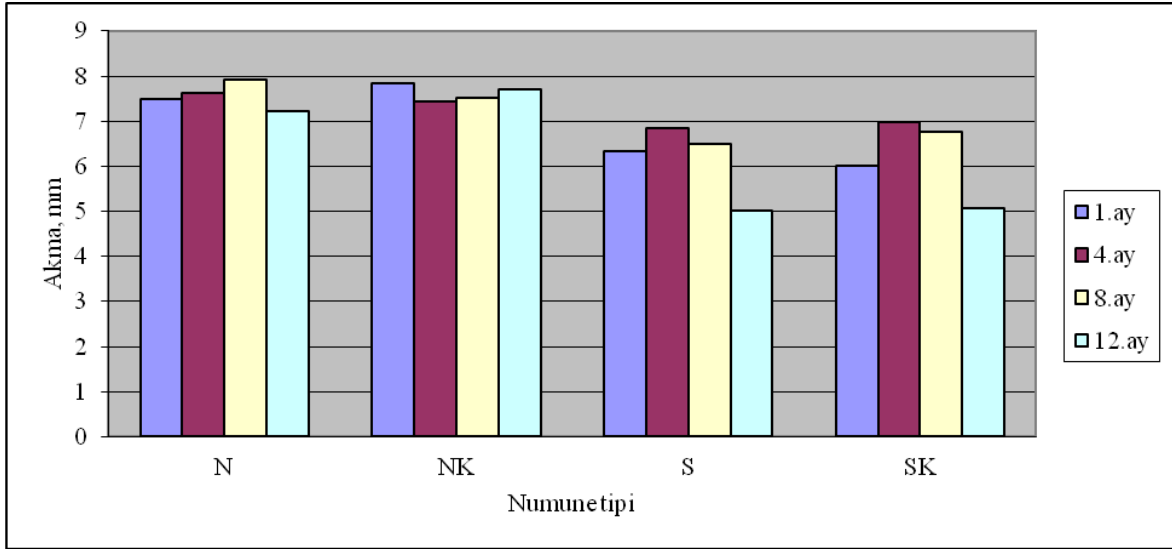
Tablo 7.57. Karot numune tiplerine ait stabilite fonksiyonları ve belirtme katsayıları

Numune	Fonksiyon	R^2
N	$y = -0,21x^2 + 1,86x + 5,075$	0,9884
NK	$y = -0,0225x^2 + 0,6295x + 7,5325$	0,9987
S	$y = -0,1975x^2 + 3,4365x + 5,4225$	0,9544
SK	$y = -0,55x^2 + 5,164x + 5,06$	0,9753

Karot numuneleri Marshall akma değerlerine ait aylık değişimler Tablo 7.58’de açıklanmıştır. Kullanılan bitüm tipi ve aylık değişimlere göre Marshall akma değerlerinin karşılaştırılması, Şekil 7.73 ve Şekil 7.74’te gösterilmiştir.

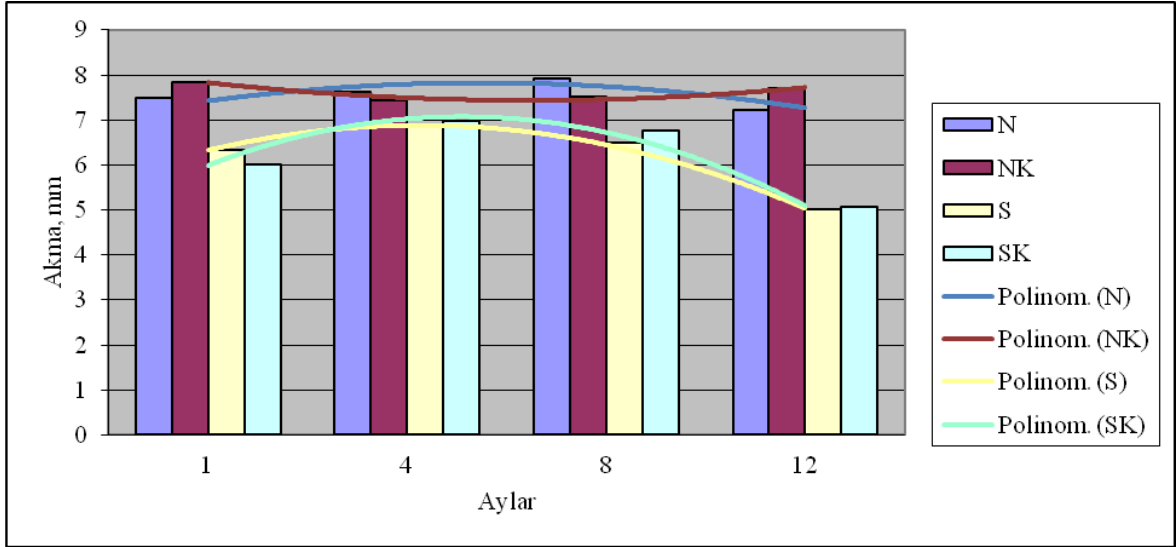
Tablo 7.58. Karot numuneleri Marshall akma aylık toplam veriler

Numune tipi	Aylar	1. ay	4. ay	8. ay	12. ay
N	Akma (mm)	7,48	7,63	7,91	7,21
NK		7,85	7,43	7,52	7,7
S		6,34	6,84	6,49	5,02
SK		6,01	6,98	6,77	5,08



Şekil 7.73. Karot numuneleri Marshall akma değerlerinin numune tipine göre aylık değişimleri

Şekil 7.73'te görüldüğü gibi, değişik tipteki karot numunelerine ait akma değerlerindeki değişimler bakımından, N ve NK tipi katkısız BSK numunelerinin katkılı S ve SK tipi olanlara göre daha büyük değerlerde olduğu, aylık periyotlardaki artışla birlikte karot numunelerinin akma değerlerindeki değişimler, N tipi olanlarda 8. aya kadar arttığı, 12. ayda azaldığı, NK tipi karot numunelerinde 4. aya kadar azaldığı, 8. ve 12. aylarda ise arttığı görülmüştür. S ve SK tipi katkılı karot numunelerinde ise 1. ve 4. aylarda artış, 8. ve 12. aylarda ise azalma saptanmıştır. NK ve N tipi karot numunelerinin değişik periyotlardaki akma değerlerinin birbirine yakın, S ve SK tipi karot numunelerinin akma değerlerinin ise aynı şekilde birbirine yakın değerlerde olduğu gözlenmiştir. En düşük akma değeri 12. ay S tipinde 5,02 mm, en büyük akma değeri ise 8. ay N tipi karot numunelerinden 7,91 mm olarak elde edilmiştir.



Şekil 7.74. Karot numuneleri Marshall akma değerlerinin aylık değişimleri ve eğilim çizgileri

Şekil 7.74'te numunelerin akma değerlerinde zamanla meydana gelen değişimleri sunulmuştur. Numunelerde zamanla meydana gelen oksidasyon neticesinde akma değerlerinde stabilitelerdeki artışla ters orantılı olarak azalmalar olmuştur. SBS katkılı numunelerin akma değerleri saf karışıma göre 1. ve 12. aylar arasında %33 ile %36 oranında azalma göstermiştir. Kaplamanın serilmesinden bir yıl sonra alınan numunelerin akma değerleri ilk aydaki akma değerlerinden katkısız tekerlek geçiş bölgesinde %19,5, yol kenar bölgesinde %10, SBS katkılı tekerlek geçiş bölgesinde %21, yol kenar bölgesinde %17 oranında azalmıştır.

Tablo 7.59'da karot numunelerin akma fonksiyonları ve R^2 değerleri verilmiştir. Tablo 7.59'a bakıldığında, bağımsız aylık periyotlardaki bağımlı akma parametrelerinden elde edilen fonksiyonların R^2 değerlerinin 0,75 ile 1,0 arasında yer aldığı için içsel bir bağımlılığın ve kuvvetli bir ilişkinin olduğu anlaşılmaktadır.

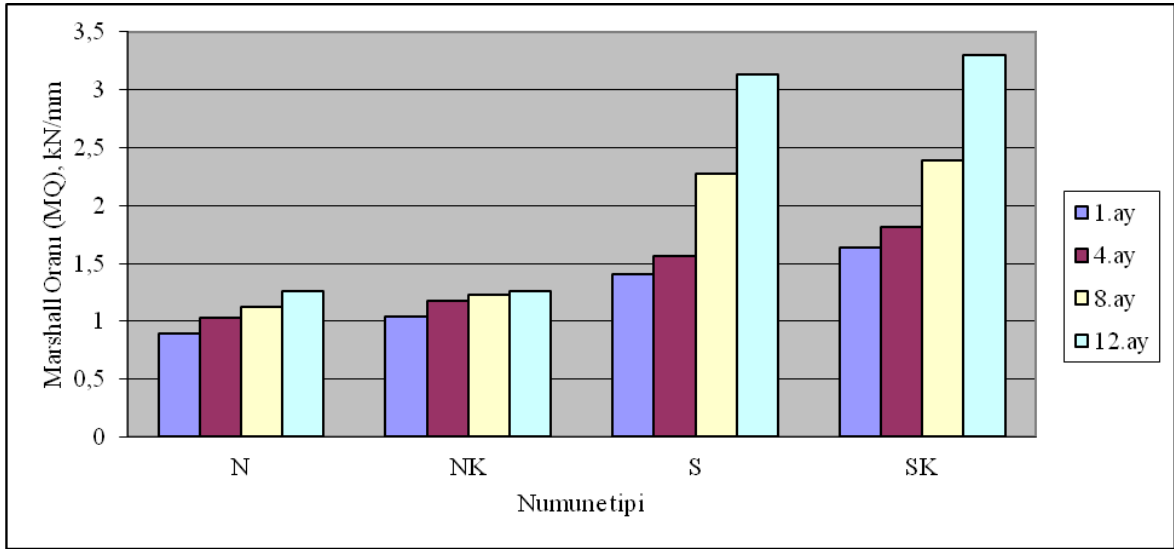
Tablo 7.59. Karot numune tiplerine ait akma fonksiyonları ve belirtme katsayıları

Numune	Fonksiyon	R^2
N	$y = -0,2125x^2 + 1,0095x + 6,6275$	0,7596
NK	$y = 0,15x^2 - 0,786x + 8,465$	0,9162
S	$y = -0,4925x^2 + 2,0315x + 4,7875$	0,9981
SK	$y = -0,665x^2 + 3,025x + 3,635$	0,9980

Karot numuneleri Marshall oranı (MQ) değerlerinin aylık değişimleri Tablo 7.60'ta gösterilmiştir. Kullanılan bitüm tipi ve aylık değişimlere göre Marshall oranı değerlerinin karşılaştırılması, Şekil 7.75 ve Şekil 7.76'da verilmiştir.

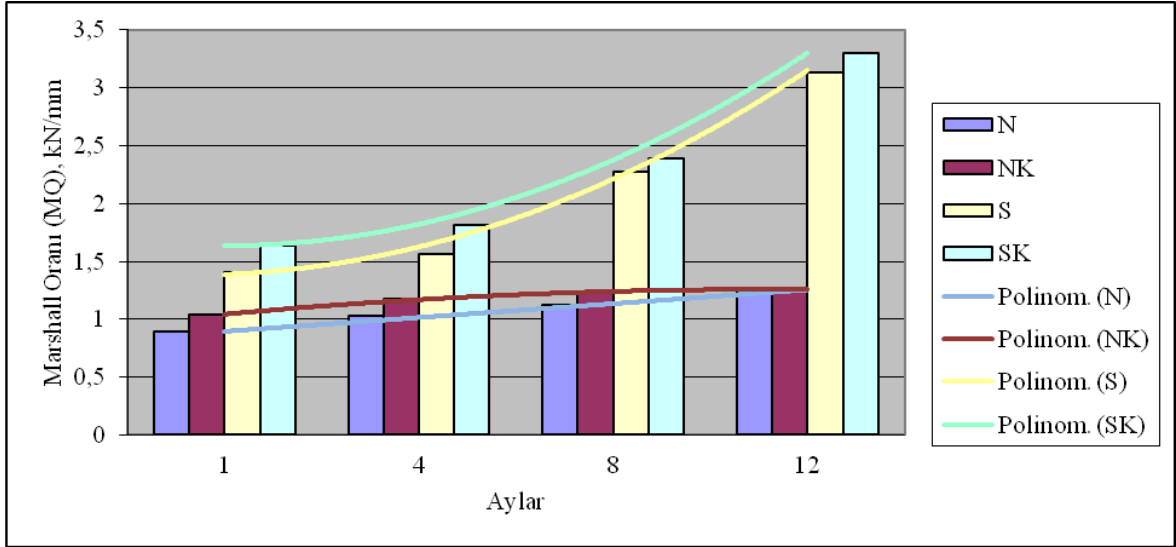
Tablo 7.60. Karot numunleri Marshall oranı aylık toplam veriler

Numune tipi	Aylar	1. ay	4. ay	8. ay	12. ay
N	Marshall Oranı (kN/mm)	0,89	1,03	1,12	1,26
NK		1,04	1,18	1,23	1,26
S		1,41	1,56	2,28	3,13
SK		1,64	1,81	2,39	3,3



Şekil 7.75. Karot numuneleri Marshall oranı (MQ) değerlerinin numune tipine göre aylık değişimleri

Şekil 7.75'e göre, karot numunelerine ait MQ değerleri bakımından katkılı BSK numunelerinin katkısız numunelere göre daha büyük değerlerde olduğu, aylık periyotlardaki artışla birlikte karot numunelerinin MQ değerlerinde de artış meydana geldiği görülmektedir. NK tipi karot numunelerinin N tipine göre, SK tipi karot numunelerinin ise S tipindekilere göre daha büyük MQ değerlerinde olduğu gözlenmiştir. En düşük MQ değeri 1. ay N tipinde 0,89 kN/mm, en büyük değer ise 12. ay SK tipi karot numunelerinde 3,30 kN/mm olarak elde edilmiştir.



Şekil 7.76. Karot numuneleri Marshall oranı (MQ) değerlerinin aylık değişimleri ve eğilim çizgileri

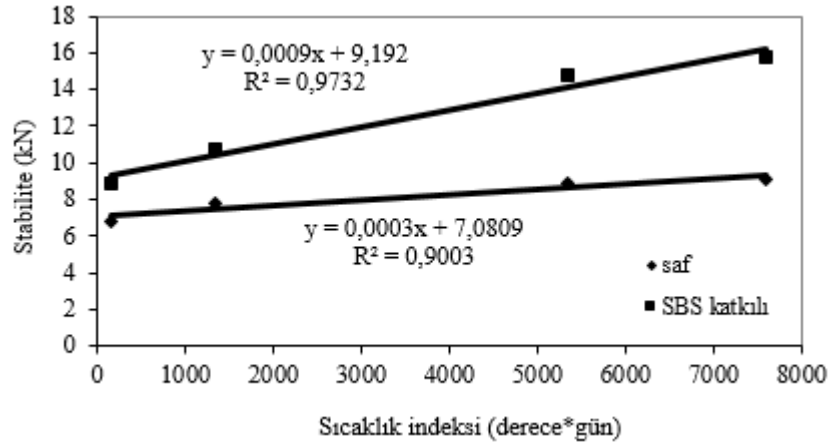
Şekil 7.76’da, karot numunelerinin Marshall oranı değerlerinin aylık değişimlere göre artış gösterdiği, en düşük değişimlerin 1. ayda en yüksek değişimlerin ise 12. ayda olduğu görülmektedir. Aylık periyotlar bakımından N ve NK tipi karot numunelerinde MQ artışları daha az, S ve SK tipi karot numunelerinde ise daha fazla olarak elde edilmiştir. En düşük MQ değeri katkısız N tipi karot numunelerinde olup, 1. aydan 12. aya kadar %42’lik bir artış gözlenmiştir. NK tipi numunelerdeki artış %21, katkılı S tipi numunelerde %122 ve en yüksek MQ değerlerine sahip SK tipi numunelerde ise %101’lik bir artış meydana gelmiştir. En düşük ve en yüksek MQ değerlerine sahip olan N ve SK tipi karot numuneleri arasında en düşük MQ değerleri olan 1. ayda %84’lük bir fark, en yüksek MQ değerleri olan 12. ayda ise %162’lik bir fark gözlenmiştir.

Karot numunelerinin MQ fonksiyon türleri ve R^2 katsayıları Tablo 7.61’de sunulmuştur. Tablo 7.61 incelendiğinde, fonksiyonların R^2 değerlerinin arasında içsel bir bağımlılığın ve kuvvetli bir ilişkinin olduğu görülmektedir.

Tablo 7.61. Karot numune tiplerine ait MQ fonksiyonları ve belirtme katsayıları

Numune	Fonksiyon	R^2
N	$y = -2E-15 x^2 + 0,12x + 0,775$	0,9931
NK	$y = -0,0275x^2 + 0,2085x + 0,8625$	0,9914
S	$y = 0,175 x^2 - 0,287x + 1,5$	0,9948
SK	$y = 0,185x^2 - 0,369x + 1,82$	0,9998

Şekil 7.77’de stabilite ile sıcaklık indeksi arasındaki ilişki verilmiştir. Numunelerin zaman ilerledikçe stabilitelerinde meydana gelen artışın maruz kalınan toplam sıcaklıkla lineer olarak arttığı tespit edilmiştir.



Şekil 7.77. Stabilite ile sıcaklık indeksi ilişkisi

7.2.5. Laboratuvar ve Karot Numunelerine Ait Çekme Dayanımı (ITS) Deney Sonuçları

Saf bitüm ve SBS modifiyeli bitüm kullanılarak laboratuvarda hazırlanan BSK numuneleri üzerinde çekme dayanımı deneyi uygulanmıştır. Deneyler arazideki saf ve SBS katkılı yol güzergahına ait kaplamalardan, belli periyotlarda temin edilen karot numunelerine de uygulanarak, indirekt çekme gerilmeleri tespit edilmiştir.

Laboratuvarda hazırlanan numuneler ve karot olarak temin edilen Marshall numuneleri 25°C’deki suda 2 saat bekletilerek Marshall deney aletinde kırılmıştır. Kırılma işlemi süresince numunelere 2 inç/dakikalık (50,8 mm/sn) sabit yükleme hızı uygulanmıştır. Maksimum yük değerleri kullanılarak çekme dayanımı değerleri Formül 7.15 kullanılarak belirlenmiştir.

7.2.5.1. Laboratuvar Kontrol Numuneleri ITS Deney Sonuçları

Laboratuvarda hazırlanan katkılı ve katkısız Marshall briket numunelerinin her tipinden üçer adet olmak üzere indirekt çekme deneyi uygulanmış ve sonuçlar

Tablo 7.62 ve Tablo 7.63'te verilmiştir. ITS değerinin kullanılan bitüm tipine göre değişimi Şekil 7.78'de gösterilmiştir. Örnek hesaplama Formül 7.15'te görülmektedir.

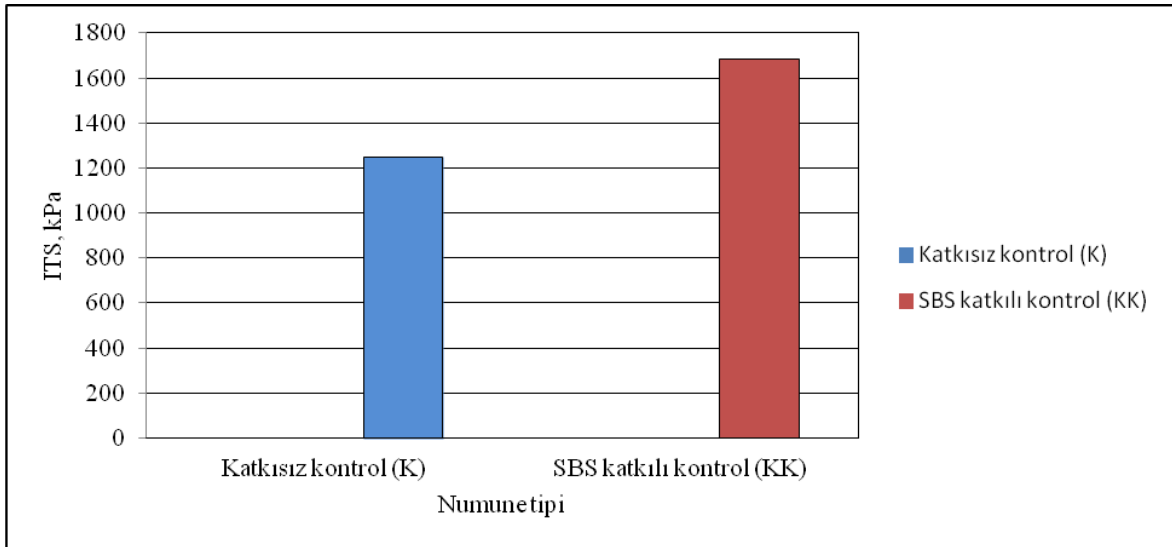
$$ITS = \left(\frac{2P_{mak}}{\pi dt} \right) = \left(\frac{2 * 13,0}{3,1416 * 100 * 65,0} \right) * 1 * 10^6 = 1273,237 kPa \quad (7.15)$$

Tablo 7.62. Laboratuvarda hazırlanan katkısız kontrol numuneleri ITS deney sonuçları

Numune tipi	Numune no	Numune yüksekliği (mm)				Maks.yük (kN)	ITS (kPa)
		h1	h2	h3	Hort		
Katkısız	1	64,9	65	65,1	65,00	13	1273,237
	2	65,2	65,1	65	65,10	12,9	1261,502
	3	64,8	65	65	64,93	12,3	1205,915
	Ortalama					12,73	1246,88

Tablo 7.63. Laboratuvarda hazırlanan katkılı kontrol numuneleri ITS deney sonuçları

Numune tipi	Numune no	Numune yüksekliği (mm)				Maks.yük (kN)	ITS (kPa)
		h1	h2	h3	Hort		
SBS katkılı	1	65	65,6	65,2	65,27	17,4	1697,215
	2	64,7	65	64,9	64,87	17,2	1688,053
	3	65,1	64,9	65	65,00	17	1665,002
	Ortalama					17,2	1683,42



Şekil 7.78. Saf ve SBS katkılı laboratuvar numunelerine ait indirekt çekme dayanımı (ITS) değerleri

Şekil 7.78’de görüldüğü üzere SBS katkılı numunelerin katkısız numunelere göre indirekt çekme dayanım değeri bakımından daha büyük değerde olduğu görülmüştür. SBS katkısı kullanımın kontrol numunelerinde saf karışım kontrol numunelerine göre çekme dayanım değerinde %35,01’lik bir artış meydana getirmiştir.

7.2.5.2. Katkısız ve SBS Katkılı Karot Numuneleri ITS Deney Sonuçları

Yol güzergahının kenar bölgelerinden ve tekerlek geçiş bölgelerinden temin edilen SBS katkılı ve katkısız BSK karot numunelerinin (NK-SK-N-S) 1. ay, 4. ay, 8. ay ve 12. aylık periyotlardaki her tipinden üçer adet olmak üzere indirekt çekme deneyi uygulanmış ve sonuçlar Tablo 7.64 - Tablo 7.67’de verilmiştir. Aylık ITS ortalama değerleri ise Tablo 7.68’de, fonksiyon türü ve belirtme katsayıları Tablo 7.69’da sunulmuştur. İndirekt çekme dayanımının (ITS) değerinin, kullanılan bitüm ve numune tipi ile aylık periyotlara göre değişimi Şekil 7.79 ve Şekil 7.80’de gösterilmiştir.

Tablo 7.64. Katkısız BSK yol kenar bölgesi (NK) karot numuneleri ITS deney sonuçları

Numune tipi	Aylar	Numune no	Numune yüksekliği (mm)				Maks.yük (kN)	ITS (kPa)
			h1	h2	h3	hort		
Katkısız yol kenar bölgesi (NK)	1. ay	1	64,3	64,2	63,8	64,10	8,46	840,217
		2	63,9	64,2	64,3	64,13	7,35	729,596
		3	64,1	63,9	64	64,00	7,92	787,815
		ortalama					7,91	785,880
	4. ay	1	65,2	64,8	65	65,00	8,87	868,739
		2	66,2	66	66,3	66,17	8,26	794,731
		3	66,2	66,4	65,9	66,17	8,61	828,406
		ortalama					8,58	830,630
	8. ay	1	62,5	62,5	63,4	62,80	10,7	1084,684
		2	63	63,5	63,1	63,20	10,6	1067,746
		3	63,8	63,2	63	63,33	10,72	1077,560
		ortalama					10,67	1076,663
	12. ay	1	64,6	63,9	63,5	64,00	11,5	1143,923
		2	63,6	64,6	63,6	63,93	11,2	1115,244
		3	63,7	63,9	64,3	63,97	11,1	1104,710
		ortalama					11,27	1121,290

Tablo 7.65. Katkısız BSK tekerlek geçiş bölgesi (N) karot numuneleri ITS deney sonuçları

Numune tipi	Aylar	Numune no	Numune yüksekliği (mm)				Maks.yük (kN)	ITS (kPa)
			h1	h2	h3	hort		
Katkısız tekerlek geçiş bölgesi (N)	1. ay	1	64,1	64,3	64	64,13	6,95	689,890
		2	63,9	64,5	64,1	64,17	7,67	760,966
		3	64,3	64	64,1	64,13	7,25	719,670
		ortalama					7,29	723,510
	4. ay	1	66,9	65	66,3	66,07	8,34	803,6423
		2	64,4	65,2	65,3	64,97	7,29	714,358
		3	64,2	64,4	63,9	64,17	8,45	838,352
		ortalama					8,03	785,450
	8. ay	1	63,1	62,2	63,2	62,83	10,1	1023,317
		2	62,4	63,8	64,5	63,57	11,2	1121,677
		3	63,2	63,1	63,4	63,23	10,6	1067,183
		ortalama					10,63	1070,73
	12. ay	1	63,1	64	64,1	63,73	11,2	1118,743
		2	64,2	63,4	63	63,53	10,5	1052,124
		3	63,9	64,4	64	64,10	10,9	1082,549
		ortalama					10,87	1084,47

Tablo 7.66. Katkılı BSK yol kenar bölgesi (SK) karot numuneleri ITS deney sonuçları

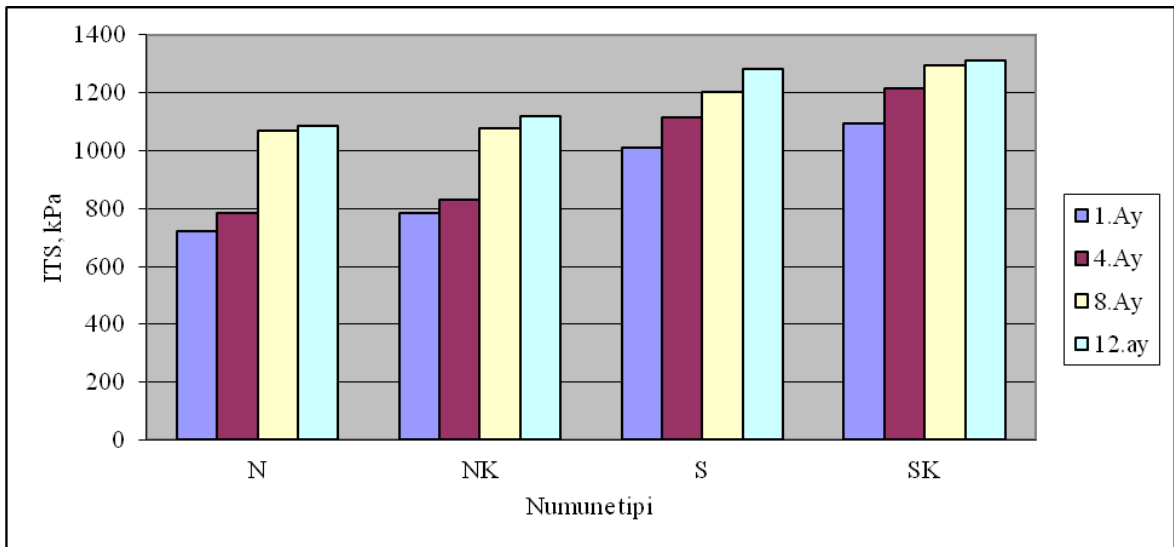
Numune tipi	Aylar	Numune no	Numune yüksekliği (mm)				Maks.yük (kN)	ITS (kPa)
			h1	h2	h3	hort		
SBS katkılı yol kenar bölgesi (SK)	1. ay	1	64,5	64,3	64,1	64,30	11,4	1128,686
		2	63,9	64,5	64,1	64,17	10,5	1041,739
		3	64,2	64,1	64,4	64,23	11,2	1110,035
		ortalama					11,03	1093,490
	4. ay	1	65,5	65,1	66,2	65,60	12,6	1222,773
		2	66,1	66,3	66,7	66,37	12,9	1237,425
		3	66,1	66,4	66,5	66,33	12,4	1190,060
		ortalama					12,63	1216,750
	8. ay	1	63	63,6	63,3	63,30	13,3	1337,602
		2	63	62,9	61,7	62,53	12,5	1272,558
		3	62,2	62,4	63,5	62,70	12,6	1279,329
		ortalama					12,80	1296,500
	12. ay	1	63,5	63,6	64,3	63,80	13,1	1307,163
		2	63,3	64,7	63,5	63,83	13,4	1336,400
		3	64,1	64	63,7	63,93	13	1294,479
		ortalama					13,17	1312,680

Tablo 7.67. Katkılı BSK tekerlek geçiş bölgesi (S) karot numuneleri ITS deney sonuçları

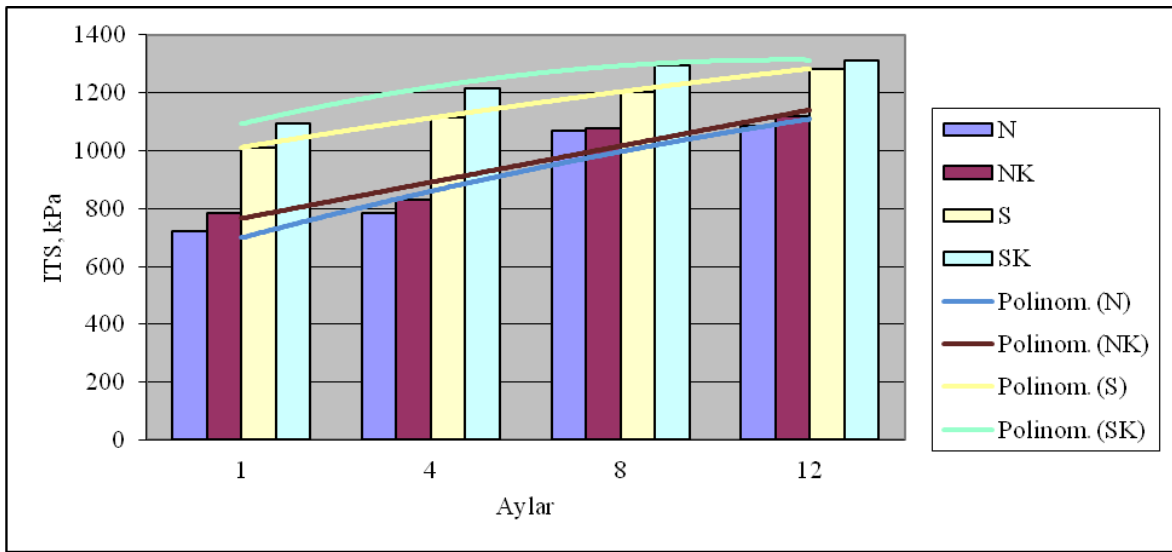
Numune tipi	Aylar	Numune no	Numune yüksekliği (mm)				Maks.yük (kN)	ITS (kPa)
			h1	h2	h3	hort		
SBS katkılı tekerlek geçiş bölgesi (S)	1. ay	1	64,3	64,2	64	64,17	9,08	900,856
		2	64,4	64	64,2	64,20	10,8	1070,947
		3	64,3	64	64,1	64,13	10,7	1062,133
		ortalama					10,19	1011,310
	4. ay	1	66,3	66,1	66,5	66,30	11,3	1085,036
		2	65,7	66,2	66,1	66,00	12,3	1186,425
		3	66,8	66,4	67	66,73	11,2	1068,450
		ortalama					11,60	1113,300
	8. ay	1	63,3	63,9	63,5	63,57	11,9	1191,781
		2	63,4	63	63,7	63,37	11,3	1135,264
		3	63,1	63,8	63,6	63,50	12,8	1283,262
		ortalama					12,00	1203,440
	12. ay	1	64,6	63,7	63,6	63,97	13	1293,805
		2	64,5	63,8	63,4	63,90	12,8	1275,229
		3	63,9	64,3	64	64,07	12,9	1281,848
		ortalama					12,90	1283,630

Tablo 7.68. Karot numune tipi aylık ITS deney sonucu ortalamaları

Numune tipi	Aylar	1. ay	4. ay	8. ay	12. ay
N	ITS (kPa)	723,5	785,45	1070,73	1084,47
NK		785,88	830,63	1076,66	1121,29
S		1011,31	1113,30	1203,44	1283,63
SK		1093,49	1216,75	1296,50	1312,68

**Şekil 7.79.** Karot numuneleri ITS değeri­lerinin numune tipine göre aylık değışimleri

Şekil 7.79 incelendiğinde, karot numunelerine ait ITS değerleri bakımından katkılı BSK numunelerinin katkısız olanlara göre daha büyük değerde olduğu, aylık periyotlardaki artışla birlikte karot numunelerinin ITS değerlerinde de artış meydana geldiği görülmektedir. NK tipi karot numunelerinin N tipine göre, SK tipi karot numunelerinin ise S tipindekilere göre daha büyük değerlerde olduğu gözlenmiştir. En düşük stabilite değeri 1. ay N tipinde 723,51 kPa, en büyük stabilite değeri ise 12. ay SK tipi karot numunelerinden 1312,68 kPa olarak elde edilmiştir.



Şekil 7.80. Karot numuneleri ITS değerlerinin aylık değişimleri ve eğilim çizgileri

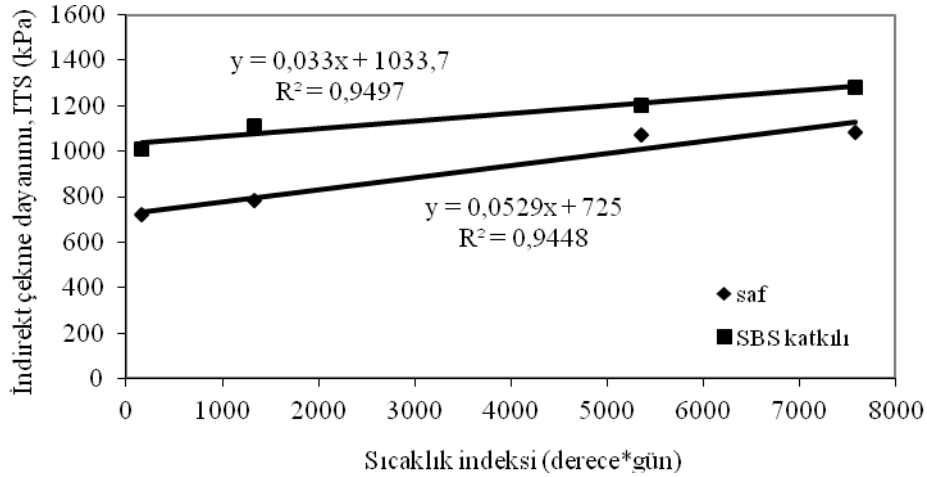
Şekil 7.80'e göre, karot numunelerinin indirekt çekme dayanımı (ITS) değerlerinin aylık değişimlere göre artış gösterdiği, ITS değişimlerinin 1. ayda en düşük, 12. ayda ise en büyük değerlerde olduğu görülmektedir. Aylık periyotlar bakımından N ve NK tipi karot numunelerinin ITS artışları daha az, S ve SK tipi karot numunelerinde ise ITS artışları daha fazla olarak elde edilmiştir. En düşük ITS değerleri katkısız N tipi karot numunelerinde olup, 1. aydan 12. aya kadar %49,89'lük bir artış gözlenmiştir. NK tipi numunelerdeki artış %42,68, katkılı S tipi numunelerde %26,93 ve en yüksek ITS değerlerine sahip SK tipi numunelerde ise %20,04'lük bir artış meydana gelmiştir. En düşük ve en yüksek ITS değeri değişimleri olan N ve SK tipi karot numuneleri arasında en düşük ITS değerleri olan 1. ayda %51,14'lük bir fark 12. ayda ise %21,04'lük bir fark gözlenmiştir.

Tablo 7.69'a bakıldığında, bağımsız aylık periyotlardaki bağımlı ITS parametrelerinden elde edilen fonksiyonlara ait R^2 değerlerinin 1,0'e yakın olduğu, R^2 değerlerinin SBS katkılı S tipi numunelerde 1,0 ve SK tipi numunelerde ise 1,0 değerine çok yakın çıktığı, dolayısıyla içsel bir bağımlılığın ve kuvvetli bir ilişkinin olduğu görülmektedir.

Tablo 7.69. Karot numune tiplerine ait ITS fonksiyonları ve belirtme katsayıları

Numune	Fonksiyon	R^2
N	$y = -12,05x^2 + 197,07x + 513,75$	0,8849
NK	$y = -0,03x^2 + 125,38x + 640,4$	0,9063
S	$y = -5,45x^2 + 117,96x + 898,9$	1,0
SK	$y = -26,77x^2 + 207,58x + 911,68$	0,9993

ITS ile sıcaklık indeksi arasındaki ilişki Şekil 7.81'de sunulmuştur. Numunelerin zaman ilerledikçe indirekt çekme dayanımlarında meydana gelen artışın, maruz kalınan toplam sıcaklıkla lineer olarak arttığı tespit edilmiştir. Numunelerin çevre koşulları etkisi ile zaman içinde yapısının değişerek gevrek özellik göstermesi, ITS değerlerinde artışa yol açmıştır.



Şekil 7.81. ITS ile sıcaklık indeksi ilişkisi

7.2.6. Laboratuvar ve Karot Numunelerine Ait İndirekt Çekme Rijitlik Modülü (ITSM) Deney Sonuçları

Saf ve SBS katkısı içeren BSK numuneleri üzerinde BS DD 213 standardına uygun olarak indirekt çekme rijitlik modülü (ITSM) deneyi uygulanarak karışımların rijitlikleri belirlenmiştir. ITSM deneyi tahribatsız bir deney olduğundan ITSM deneylerinde kullanılan numuneler yorulma deneylerinde de kullanılmıştır. Deneylerde her bir karışım türü için iki adet numune denenmiştir. Deneylerde kullanılan UMATTA deney aleti, en fazla 5 kN yük uygulayabildiğinden düşük sıcaklıklarda ve yüksek SBS katkılı bitüm içeriklerinde deney yapabilmek için bazı numuneler kesilerek yükseklikleri azaltılmıştır. Deneyde 5 adet ön yükleme, ardından 5 defa deney yükleme yapılarak dinamik yükler karşısında BSK rijitlikleri belirlenmektedir. Deneyde yük periyodu 3000 ms., yük artış süresi ise 124 ms. olarak seçilmiştir. Deformasyon kontrollü bir deney olan ITSM deneyinde hedef deformasyon 5µm. olarak seçilmiştir. 5 defa tekrarlanan ön yükleme sırasında cihaz otomatik olarak numunede yatay ekseninde 5µm. deformasyon meydana getirecek yükü belirlemektedir. Ardından numuneye uygulanan 5 darbe sonucu Formül 6.10 kullanılarak belirlenen ITSM değerlerinin ortalamasından numunenin ITSM değeri belirlenmektedir. Deneyde poisson oranı 0,35 olarak alınmıştır. Deneyler 20°C sıcaklık değerinde yapılmıştır. Deneyler, katkısız ve SBS katkılı olarak laboratuvar Marshall sıkıştırma cihazında hazırlanan Marshall briketleri ile katkısız ve SBS katkılı yol güzergahından, tekerlek geçiş bölgesi ve yol kenarından temin edilen karot numuneleri üzerinde uygulanmıştır.

7.2.6.1. Laboratuvar Kontrol Numuneleri ITSM Deney Sonuçları

Laboratuvarda hazırlanan katkılı ve katkısız Marshall briket numunelerinin her tipinden ikişer adet olmak üzere indirekt çekme rijitlik modülü deneyi uygulanmış ve sonuçlar Tablo 7.70 ve Tablo 7.71’de verilmiştir. İndirekt çekme rijitlik modülü (ITSM) değerinin kullanılan bitüm tipine göre değişimi Şekil 7.82’de gösterilmiştir. Örnek hesaplama Formül 7.16’da görülmektedir.

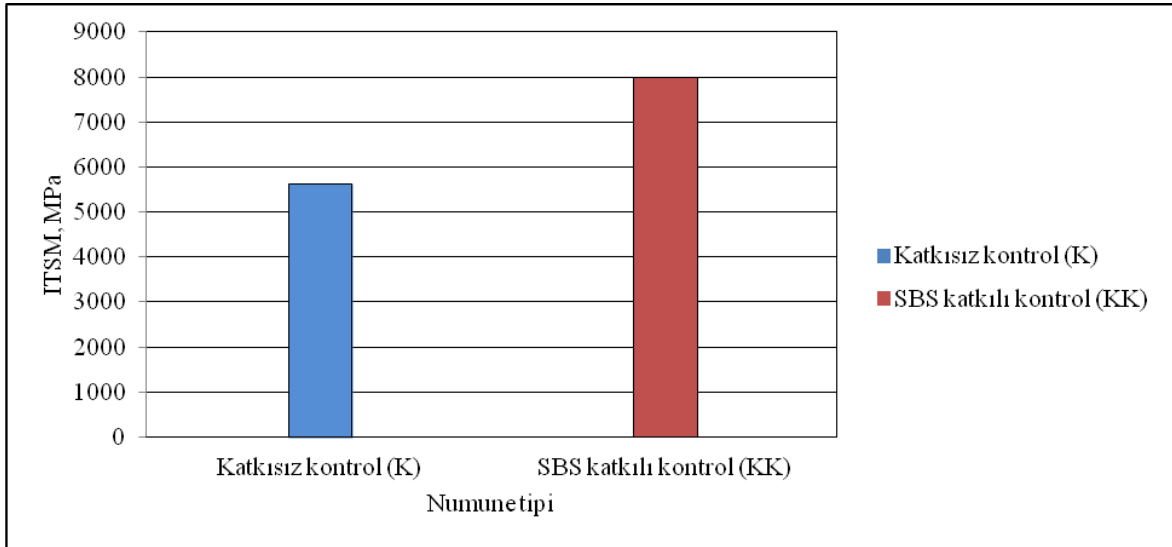
$$S_m = F(R + 0,27) / LH = 2654(0,35 + 0,27) / 65,27 \times 0,005 = 5042 \text{ MPa} \quad (7.16)$$

Tablo 7.70. Laboratuvarda hazırlanan katkısız kontrol numuneleri ITSM deney sonuçları

Numune tipi	Numune no	Numune yüksekliği (mm)				ITSM (MPa)		
		h1	h2	h3	Hort	1	2	ortalama
Katkısız	1	65	65,6	65,2	65,27	5042	5569	5305,5
	2	64,7	65	64,9	64,87	6130	5821	5975,5
	3	65,1	64,9	65	65,00	5320	5784	5552
	Ortalama							5611,00

Tablo 7.71. Laboratuvarda hazırlanan SBS katkılı kontrol numuneleri ITSM deney sonuçları

Numune tipi	Numune no	Numune yüksekliği (mm)				ITSM (MPa)		
		h1	h2	h3	hort	1	2	ortalama
SBS katkılı	1	64,9	65	65,1	65,00	7981	8128	8054,5
	2	65,2	65,1	65	65,10	7860	8012	7936
	3	64,8	65	65	64,93	7853	8066	7959,5
	Ortalama							7983,33

**Şekil 7.82.** Saf ve SBS katkılı laboratuvar numunelerine ait indirekt çekme rijitlik modülü (ITSM) değerleri

Şekil 7.82’de görüldüğü üzere BSK’da SBS kullanılması ITSM değerini arttırmıştır. SBS katkılı kontrol numunelerinin ITSM değeri katkılı kontrol numunelerine göre 1,42 kat artarak %42,28 oranında daha fazla değerde olduğu belirlenmiştir.

Whiteok ve Read'e göre malzemelerin yorulma ömrünü arttırmak, malzemelerin elastik bileşen oranını ya da rijitliğini arttırmakla mümkündür [206]. Bu bakımdan SBS kullanımıyla rijitliğin artması, yorulma ömrünün artmasını sağlamaktadır.

7.2.6.2. Katkısız ve SBS Katkılı Karot Numuneleri ITSM Deney Sonuçları

Yol güzergahının kenar bölgelerinden ve tekerlek geçiş bölgelerinden temin edilen SBS katkılı ve katkısız BSK karot numunelerinin (NK-SK-N-S) 1. ay, 4. ay, 8. ay ve 12. aylık periyotlardaki her tipinden üçer adet olmak üzere indirekt çekme rijitlik modülü deneyi (ITSM) uygulanmış ve sonuçlar Tablo 7.72 - Tablo 7.75'te verilmiştir. Aylık ITSM ortalama değerleri ise Tablo 7.76'da sunulmuştur. ITSM değerinin, kullanılan bitüm ve numune tipi ile aylık periyotlara göre değişimi Şekil 7.83 ve Şekil 7.84'te gösterilmiştir.

Tablo 7.72. Katkısız BSK yol kenar bölgesi (NK) karot numuneleri ITSM deney sonuçları

Numune tipi	Aylar	Numune no	Numune yüksekliği (mm)				ITSM (MPa)		
			h1	h2	h3	Hort	1	2	ortalama
Katkısız yol kenar bölgesi (NK)	1. ay	1	64,3	64,2	63,8	64,10	2790	2989	2889,5
		2	63,9	64,2	64,3	64,13	3032	2876	2954
		3	64,1	63,9	64	64,00	2990	3102	3046
		Ortalama							2963,47
	4. ay	1	65,2	64,8	65	65,00	3338	3901	3619,5
		2	66,2	66	66,3	66,17	3570	3965	3767,5
		3	66,2	66,4	65,9	66,17	3180	3666	3423
		Ortalama							3603,33
	8. ay	1	62,5	62,5	63,4	62,80	7367	7050	7208,5
		2	63,0	63,5	63,1	63,20	6986	7173	7079,5
		3	63,8	63,2	63	63,33	7045	7215	7130
		Ortalama							7139,33
	12. ay	1	64,6	63,9	63,5	64,00	8250,9	8339,1	8295
		2	63,6	64,6	63,6	63,93	8013,6	8393,7	8203,65
		3	63,7	63,9	64,3	63,97	8247,75	8185,8	8216,77
		Ortalama							8238,48

Tablo 7.73. Katkısız BSK tekerlek geçiş bölgesi (N) karot numuneleri ITSM deney sonuçları

Numune tipi	Aylar	Numune no	Numune yüksekliği (mm)				ITSM (MPa)		
			h1	h2	h3	Hort	1	2	ortalama
Katkısız tekerlek geçiş bölgesi (N)	1. ay	1	64,1	64,3	64	64,13	2778	3018	2898
		2	63,9	64,5	64,1	64,17	2606	2954	2780
		3	64,3	64	64,1	64,13	2860	3062	2961
		Ortalama							2879,67
	4. ay	1	66,9	65	66,3	66,07	3241	3350	3295,5
		2	64,4	65,2	65,3	64,97	3056	3170	3113
		3	64,2	64,4	63,9	64,17	3421	3089	3255
		Ortalama							3221,17
	8. ay	1	63,1	62,2	63,2	62,83	6500	6947	6723,5
		2	62,4	63,8	64,5	63,57	6860	7013	6936,5
		3	63,2	63,1	63,4	63,23	6675	6954	6814,5
		Ortalama							6824,83
	12. ay	1	63,1	64	64,1	63,73	7917,52	8117,2	8017,36
		2	64,2	63,4	63	63,53	8225,36	8034	8129,68
		3	63,9	64,4	64	64,10	7878	8145,28	8011,64
		Ortalama							8052,89

Tablo 7.74. Katkılı BSK yol kenar bölgesi (SK) karot numuneleri ITSM deney sonuçları

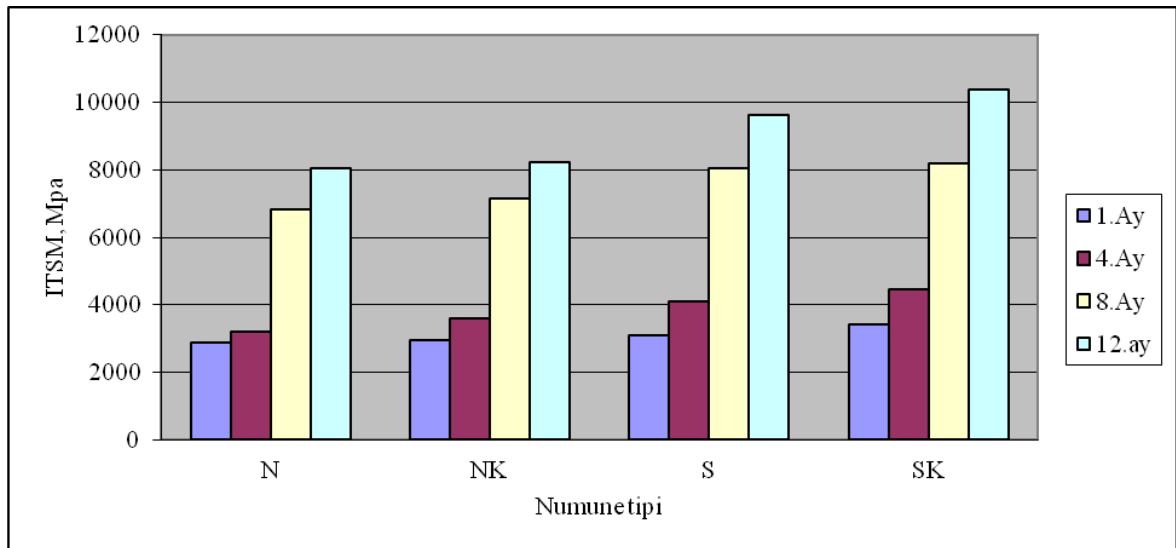
Numune tipi	Aylar	Numune no	Numune yüksekliği (mm)				ITSM (MPa)		
			h1	h2	h3	Hort	1	2	ortalama
SBS katkılı yol kenar bölgesi (SK)	1. ay	1	64,5	64,3	64,1	64,30	3438	3519	3478,5
		2	63,9	64,5	64,1	64,17	3340	3611	3475,5
		3	64,2	64,1	64,4	64,23	3468	3109	3288,5
		Ortalama							3414,17
	4. ay	1	65,5	65,1	65	65,00	4033	4107	4070
		2	66,1	66,3	66,3	66,37	4647	4750	4698,5
		3	66,1	66,4	65,9	66,33	4565	4690	4627,5
		Ortalama							4465,33
	8. ay	1	63	63,6	63,3	63,30	8535	7980	8257,5
		2	63	62,9	61,7	62,53	8139	8357	8248
		3	62,2	62,4	63,5	62,70	7996	8238	8117
		Ortalama							8207,50
	12. ay	1	63,5	63,6	64,3	63,80	10530,79	10370,50	10450,65
		2	63,3	64,7	63,5	63,83	10320,13	10119,77	10219,95
		3	64,1	64	63,7	63,93	10631,54	10304,10	10467,82
		Ortalama							10379,47

Tablo 7.75. Katkılı BSK tekerlek geçiş bölgesi (S) karot numuneleri ITSM deney sonuçları

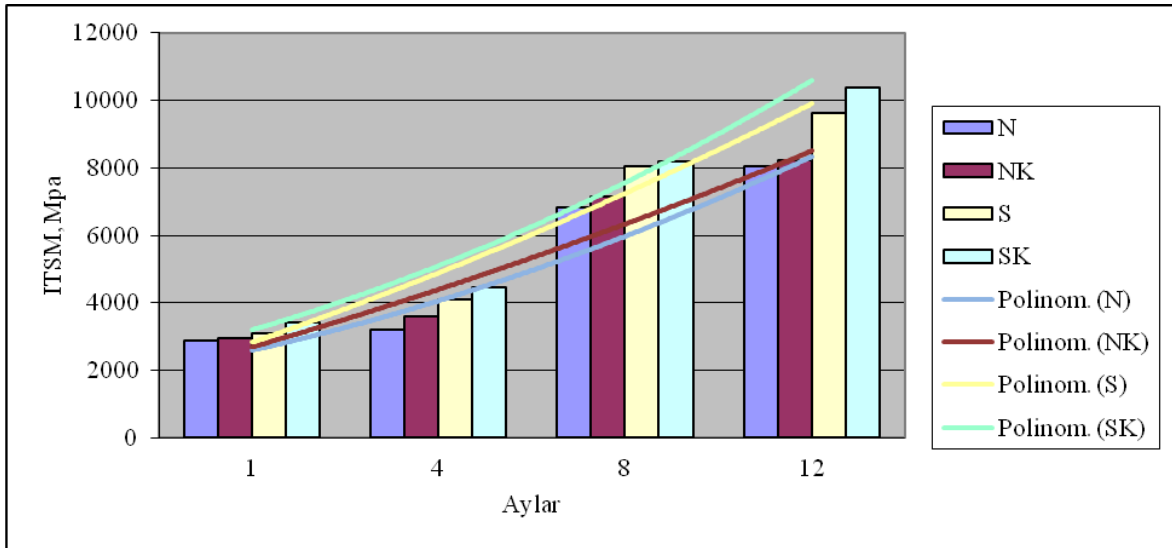
Numune tipi	Aylar	Numune no	Numune yüksekliği (mm)				ITSM (MPa)		
			h1	h2	h3	Hort	1	2	Ortalama
SBS katkılı tekerlek geçiş bölgesi (S)	1. ay	1	64,3	64,2	64	64,17	3026	2988	3007
		2	64,4	64	64,2	64,20	2912	3227	3069,5
		3	64,3	64	64,1	64,13	3151	3330	3240,5
		Ortalama							3105,67
	4. ay	1	66,3	66,1	66,5	66,30	3855	4015	3935
		2	65,7	66,2	66,1	66,00	4237	4056	4146,5
		3	66,8	66,4	67	66,73	3942	4433	4187,5
		Ortalama							4089,67
	8. ay	1	63,3	63,9	63,5	63,57	7945	8012	7978,5
		2	63,4	63	63,7	63,57	8120	8234	8177
		3	63,1	63,8	63,6	63,50	7885	8157	8021
		Ortalama							8058,83
	12. ay	1	64,6	63,7	63,6	63,97	9414,64	9853,97	9634,308
		2	64,5	63,8	63,4	63,90	9457,34	9725,88	9591,611
		3	63,9	64,3	64	64,07	9804,53	9564,08	9684,309
		Ortalama							9636,74

Tablo 7.76. Karot numune tipi aylık ITSM deney sonucu ortalamaları

Numune tipi	Aylar	1. ay	4. ay	8. ay	12. ay
N	ITSM (MPa)	2879,67	3221,17	6824,83	8052,89
NK		2963,47	3603,33	7139,33	8238,48
S		3105,67	4089,67	8058,83	9636,74
SK		3414,17	4465,33	8207,50	10379,47

**Şekil 7.83.** Karot numuneleri ITSM değeri­lerinin numune tipine göre aylık değışimleri

Şekil 7.83'teki verilerden, karot numunelerine ait ITSM değerleri bakımından katkılı BSK numunelerinin katkısız olanlara göre daha büyük değerde olduğu, aylık periyotlardaki artışla birlikte karot numunelerinin ITSM değerlerinin arttığı görülmektedir. NK tipi karot numunelerinin N tipine göre, SK tipi karot numunelerinin ise S tipindekilere göre daha büyük değerlerde olduğu gözlenmiştir. En düşük ITSM değeri 1. ay N tipinde 2879,67 MPa, en büyük değer ise 12. ay SK tipi karot numunelerinden 10379,47 MPa olarak elde edilmiştir. Karışımda SBS kullanılması ile ITSM değerlerinde meydana gelen artış, deney sıcaklıklarında SBS içeren karışımların saf karışıma göre daha rijit olacağını ve yüksek sıcaklıklarda tekerlek izi oluşumuna karşı BSK dayanımını arttıracak olduğunu göstermektedir. Karot numunelerinin alındığı tekerlek geçiş bölgelerinin ITSM değerlerinin yol kenarından temin edilenlere göre daha düşük değerde olduğu, katkısız olanlarda bu farkın daha düşük, SBS katkılı olanlarda ise daha yüksek değerde olduğu tespit edilmiştir. Bu bakımdan trafik yüküne maruz kalan asfalt betonu kaplamalardaki indirekt çekme rijitlik modülü değerlerinin taşıt tekerlek yüküne maruz kalmayanlara göre daha düşük değerlerde olduğu saptanmıştır.



Şekil 7.84. Karot numuneleri ITSM değerlerinin aylık değişimleri ve eğilim çizgileri

Şekil 7.84 incelendiğinde, karot numunelerinin ITSM değerlerinin aylık değişimlere göre lineer bir şekilde artış gösterdiği, ITSM değişimlerinin 1. ayda en düşük, 12. ayda ise en büyük değerlerde olduğu belirlenmiştir. Aylık periyotlar bakımından 1. ve 4. aydaki karot numunelerinin ITSM artışlarının daha az olduğu görülmüştür. En düşük ITSM

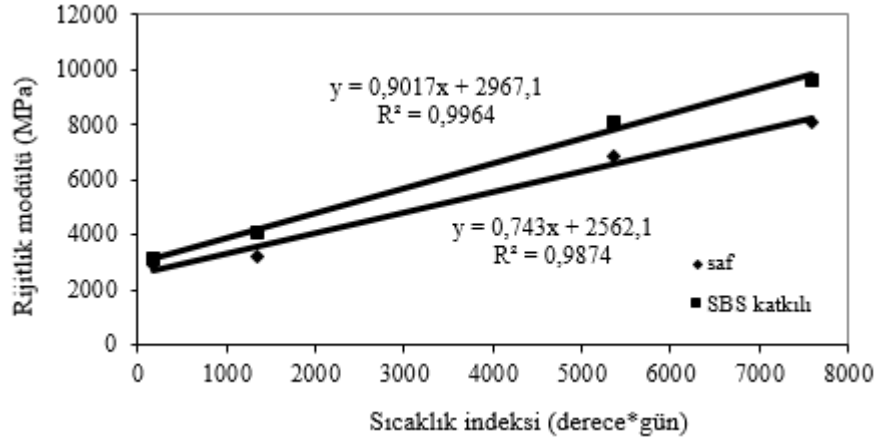
değerleri katkısız N tipi karot numunelerinde olup, 1. aydan 12. aya kadar 2,796 kat artarak %179,65'lik bir oranda artış gözlenmiştir. Bir yıllık zaman periyodundaki ITSM değerleri, NK tipi numuneler için yaklaşık 2,78 kat artarak %178,0 oranında bir artış, katkılı S tipi numuneler için 3,103 kat artarak %210,30 oranında artış ve en yüksek ITSM değerlerine sahip SK tipi numunelerde ise %204,01'lik bir oranda 3,04 katlık bir artış meydana gelmiştir. En düşük ve en yüksek stabilite değeri değişimleri olan N ve SK tipi karot numuneleri arasında en düşük ITSM değerleri olan 1. ayda %18,56 oranında bir fark, 12. ayda ise %28,89 oranında bir fark gözlenmiştir. Dolayısıyla karışımların kalıcı deformasyon ve yorulma çatlaklarına karşı dayanımları, SBS katkı kullanımıyla artmıştır.

Grafik eğilim çizgilerinden elde edilen karot numune tipi fonksiyon ve belirtme katsayıları Tablo 7.77'de verilmiştir. Tablo 7.77'de gösterilen bağımsız aylık periyotlardaki bağımlı ITSM parametrelerinden elde edilen fonksiyonlara ait belirtme katsayısı değerlerinin 1,0'e yakın olduğu, SBS katkılılarda bu değerlerin daha iyi çıktığı, dolayısıyla içsel bir bağımlılığın ve kuvvetli bir ilişkinin olduğu görülmektedir.

Tablo 7.77. Karot numune tiplerine ait ITSM fonksiyonları ve belirtme katsayıları

Numune	Fonksiyon	R ²
N	$y = 221,5x^2 + 804,7x + 1571$	0,9209
NK	$y = 114,75x^2 + 1362,3x + 1219,3$	0,9297
S	$y = 148,5x^2 + 1613,7x + 1074$	0,9507
SK	$y = 280,25x^2 + 1062,5x + 1858,3$	0,9712

Şekil 7.85'te sıcaklık indeksleri ile rijitlik modülleri arasındaki ilişki verilmiştir. Sıcaklık indeksleri ile rijitlik modülü arasında yüksek bir belirtme katsayısı ile doğrusal bir ilişkinin olduğu tespit edilmiştir. Kaplamanın sürekli maruz kaldığı sıcaklıkların birbiri üzerine eklenerek karışımın yaşlanmasına ve dolayısıyla sertleşmesine önemli derecede etkisi olduğu şekilden görülmektedir.



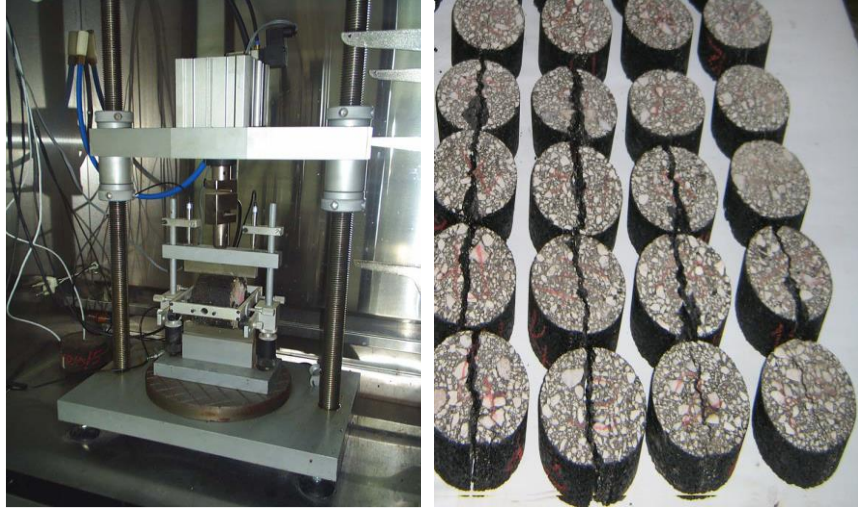
Şekil 7.85. Rijitlik modülü ile sıcaklık indeksi ilişkisi

7.2.7. Laboratuvar ve Karot Numunelerine Ait İndirekt Çekme Yorulma Deneyi Sonuçları

İndirekt çekme yorulma deneyi, laboratuvarda hazırlanan saf BSK ve % 5 oranındaki SBS katkılı BSK numuneleri ile yol güzergahından temin edilen katkısız ve SBS katkılı BSK karot numuneleri üzerinde uygulanmıştır. Gerilme kontrollü olarak yapılan deneyde 300 kPa gerilme seviyesi uygulanmıştır.

Deney, 25°C sıcaklıkta yapılmıştır. Deneye başlamadan önce numuneler 3 saat deney sıcaklığında bekletilmiştir. Bu süre sonunda numune, yükleme başlıkları arasına yerleştirilmiş, düşey deformasyonu okuyacak doğrusal değişken türevsel dönüştürücüler olan 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 1,376 sn. olmuştur. İndirekt çekme yorulma deneyleri, numuneler tam olarak kırılıncaya kadar devam etmiştir.

Numunelerin deneye tabi tutulması ve deneyden sonraki durumları Şekil 7.86'da görülmektedir.



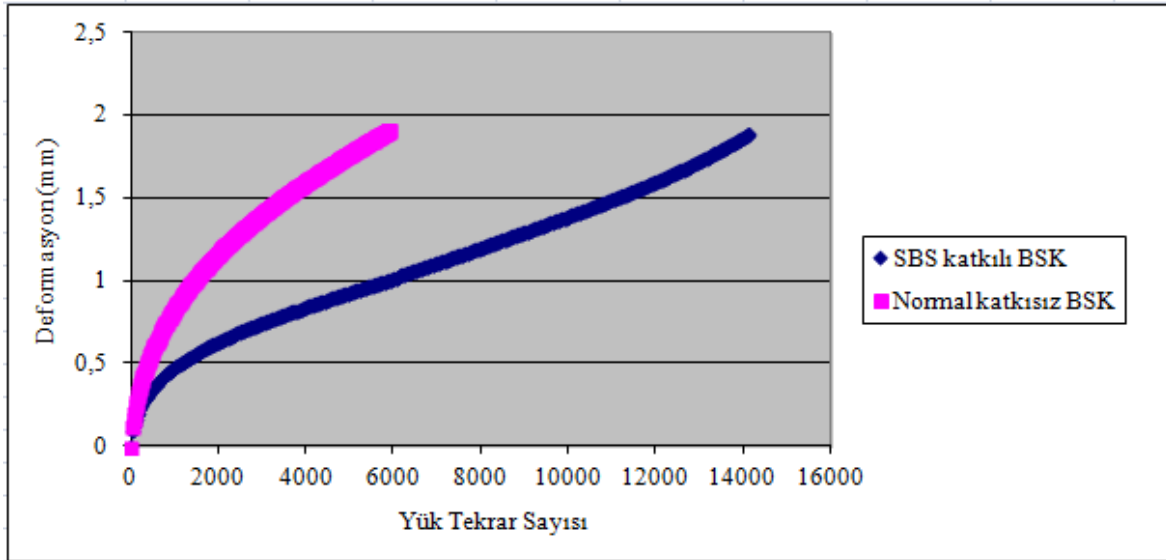
Şekil 7.86. Yorulma deneyi ve deney sonrasındaki numunelerin görünüşü

7.2.7.1. Laboratuvar Ortamında Hazırlanan Numunelerin İndirekt Çekme Yorulma Deney Sonuçları

Laboratuvar ortamında hazırlanan katkısız ve SBS katkılı kontrol numunelerine uygulanan indirekt çekme yorulma deneyinde, numunelerde kırılma meydana gelinceye kadar yük tekrarı uygulanmıştır. Böylece maksimum yük tekerrür sayısı (N_{mak}) miktarları belirlenmiştir. Ayrıca numunelerdeki yük tekerrür sayısına bağlı olarak meydana gelen deformasyon değişimleri, maksimum yük tekerrür sayısı (N_{mak}) ile maksimum deformasyon miktarı (δ_{mak}) değerleri grafiklerle gösterilmiştir. Laboratuvarında hazırlanan ve karot numunesi olarak araziden temin edilen BSK numunelerine, 300 kPa gerilme seviyesinde uygulanan indirekt çekme yorulma deneylerinden elde edilen N_{mak} değerleri Tablo 7.78’de verilmiştir. Ayrıca 300 kPa gerilme seviyesinde uygulanan deneylerden elde edilen deformasyon–yük tekerrür sayısı ilişkisine ait örnek Şekil 7.87’de çizilmiştir.

Tablo 7.78. Laboratuvarda hazırlanan numunelerin 300 kPa gerilme seviyesinde indirekt çekme yorulma deney sonuçları

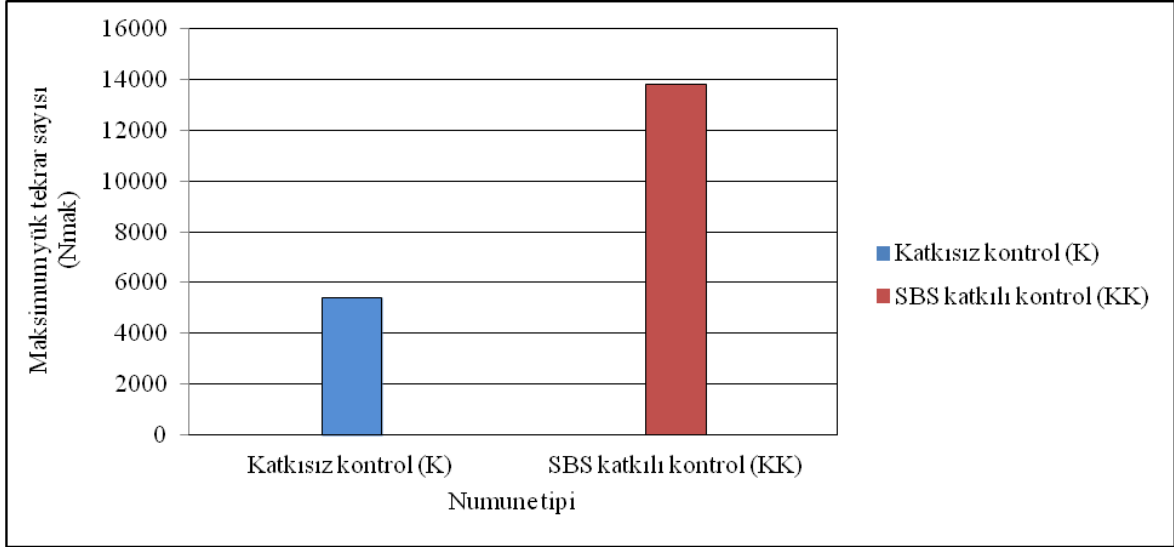
Numune Tipi	Asfalt İçeriği (%)	Numune No	σ (kPa)	N_{mak}
Normal BSK	4,95	1	300	5247
		2		5904
		3		5033
		Ort.		5395
SBS katkılı BSK	5,24	1	300	15034
		2		14112
		3		12352
		Ort.		13833



Şekil 7.87. Laboratuvarda hazırlanan numunelerin deformasyon-yük tekrar sayısı ilişkisi

Şekil 7.87’de görüldüğü üzere, BSK’larda SBS katkı kullanılması ile numunenin kırılması için gerekli yük tekrerrür sayısı artmıştır. SBS katkılı BSK numunelerini katkısız BSK numunelerine göre tercih edilmesi özellikle yorulma dayanımını önemli oranda artırmaktadır. Deformasyonlar incelendiğinde, SBS kullanılması ile maksimum yük tekrar sayısındaki deformasyon miktarları azalmıştır. Bu durum, SBS içerikli numunelerin dayanabileceği yük tekrar sayısı artmasına rağmen BSK esnekliğinin azaldığını, dolayısıyla daha gevrek bir kırılmanın olduğunu göstermektedir. 300 kPa gerilme

seviyesinde her tip karışım numunesinden üçer adet olmak üzere elde edilen maksimum yük tekrar sayılarının (N_{mak}) ortalamasının numune tipine göre değişimi Şekil 7.88’de verilmiştir.



Şekil 7.88. Maksimum yük tekrar sayısı - asfaltit içeriği ilişkisi

Şekil 7.88 incelendiğinde, 300 kPa gerilme seviyesinde katkısız kontrol numunelerinin maksimum yük tekerrür sayısı (N_{mak}) ortalaması 5395, SBS katkılı kontrol numunelerinin N_{mak} ortalaması 13833 olarak belirlenmiştir. SBS katkısı kullanımı N_{mak} değerini 2,56 kat arttırmıştır. Bu durum N_{mak} değeri açısından SBS kullanımının daha etkin olduğunu göstermektedir.

7.2.7.2. Karot Numunelerinin İndirekt Çekme Yorulma Deneyi Sonuçları

Karot olarak bir yıllık periyotlarda temin edilen numunelere 300 kPa gerilme seviyesinde uygulanan indirekt çekme yorulma deneyinden elde edilen N_{mak} değerleri Tablo 7.79 - Tablo 7.82’de verilmiştir. Ayrıca 300 kPa gerilme seviyesinde uygulanan deneylerden elde edilen deformasyon–maksimum yük tekerrür sayısı ilişkisine birer örnek Şekil 7.89 - Şekil 7.92’de gösterilmiştir.

Tablo 7.79. Katkısız BSK yol kenar bölgesi (NK) karot numuneleri yorulma deney sonuçları

Numune Tipi	Aylar	Numune No	σ (kPa)	N_{mak}
Katkısız yol kenar bölgesi (NK)	1. ay	1	300	1970
		2		2460
		3		2796
		Ortalama		2409
	4. ay	1	300	3028
		2		3540
		3		2747
		Ortalama		3105
	8. ay	1	300	6228
		2		6836
		3		7656
		Ortalama		6907
	12. ay	1	300	12960
		2		11447
		3		10340
		Ortalama		11582

Tablo 7.80. Katkısız BSK tekerlek geçiş bölgesi (N) karot numuneleri yorulma deney sonuçları

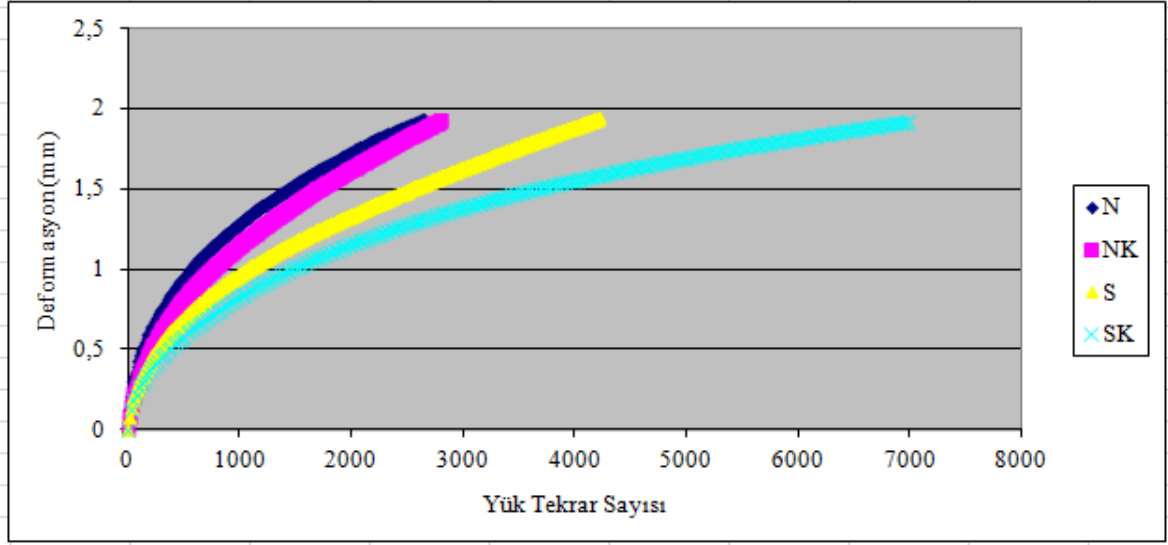
Numune Tipi	Aylar	Numune No	σ (kPa)	N_{mak}
Katkısız tekerlek geçiş bölgesi (N)	1. ay	1	300	2640
		2		1982
		3		2146
		Ortalama		2256
	4. ay	1	300	2866
		2		2448
		3		2245
		Ortalama		2520
	8. ay	1	300	4483
		2		5148
		3		4968
		Ortalama		4866
	12. ay	1	300	7680
		2		7164
		3		8088
		Ortalama		7644

Tablo 7.81. Katkılı BSK yol kenar bölgesi (SK) karot numuneleri yorulma deney sonuçları

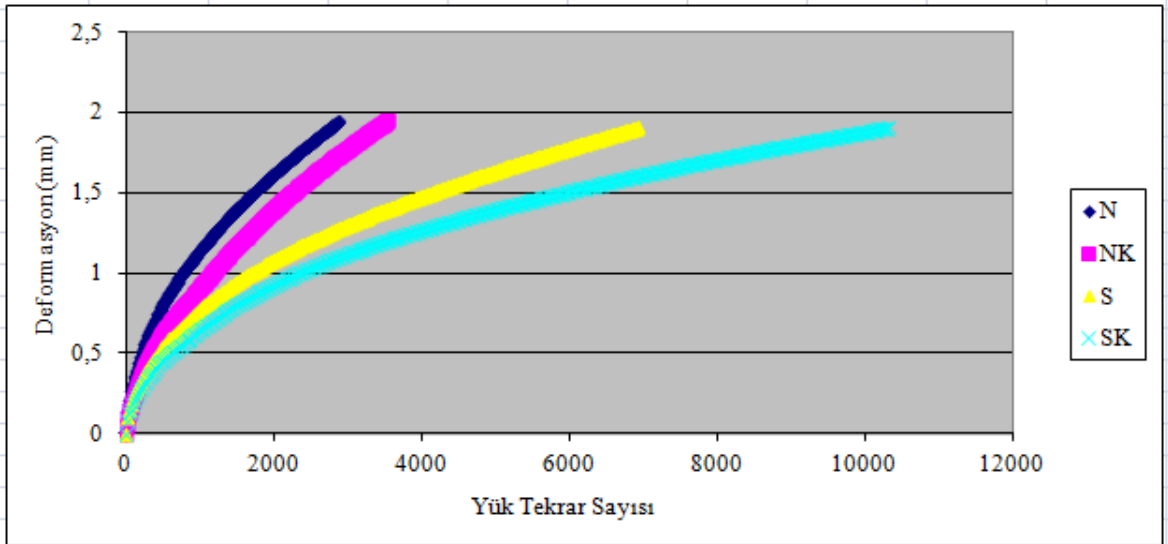
Numune Tipi	Aylar	Numune No	σ (kPa)	N_{mak}
SBS katkılı yol kenar bölgesi (SK)	1. ay	1	300	5681
		2		6984
		3		5014
		Ortalama		5893
	4. ay	1	300	10320
		2		8884
		3		8375
		Ortalama		9193
	8. ay	1	300	16346
		2		15335
		3		17904
		Ortalama		16528
	12. ay	1	300	40830
		2		39017
		3		44544
		Ortalama		41464

Tablo 7.82. Katkılı BSK tekerlek geçiş bölgesi (S) karot numuneleri yorulma deney sonuçları

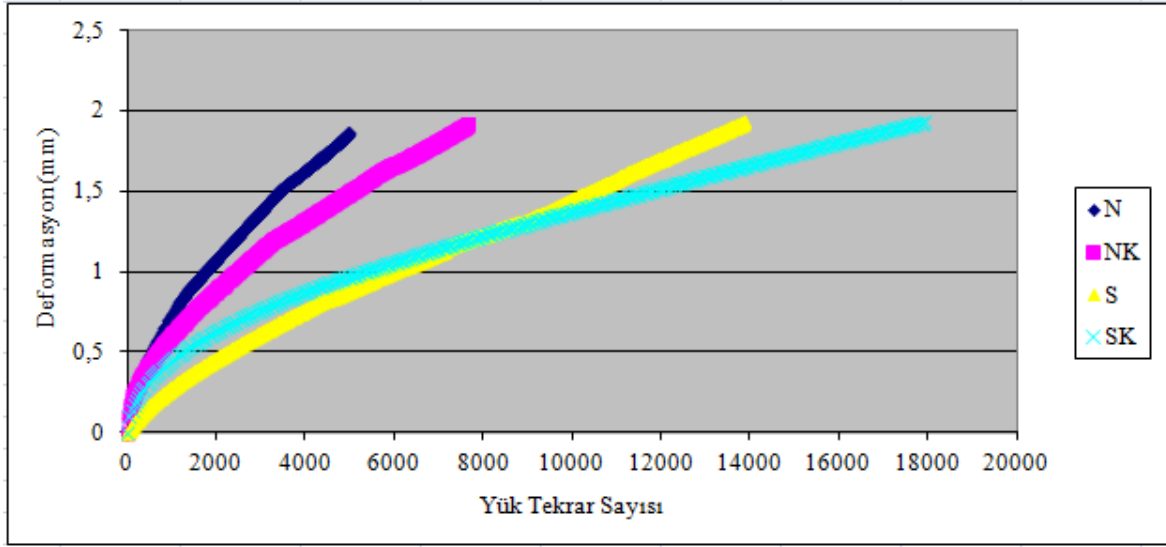
Numune Tipi	Aylar	Numune No	σ (kPa)	N_{mak}
SBS katkılı tekerlek geçiş bölgesi (S)	1. ay	1	300	3013
		2		4212
		3		3422
		Ortalama		3549
	4. ay	1	300	6912
		2		5740
		3		6100
		Ortalama		6251
	8. ay	1	300	13848
		2		10475
		3		12643
		Ortalama		12322
	12. ay	1	300	36167
		2		35011
		3		39072
		Ortalama		36750



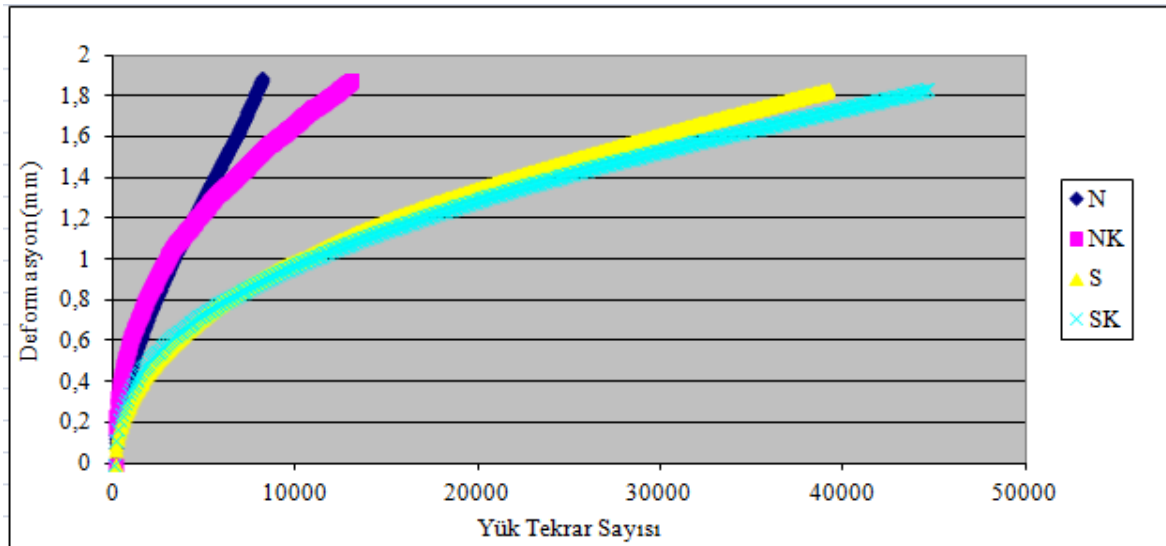
Şekil 7.89. Karot numunelerine ait 1. ay deformasyon-yük tekrar sayısı ilişkisi



Şekil 7.90. Karot numunelerine ait 4. ay deformasyon-yük tekrar sayısı ilişkisi



Şekil 7.91. Karot numunelerine ait 8. ay deformasyon-yük tekrar sayısı ilişkisi

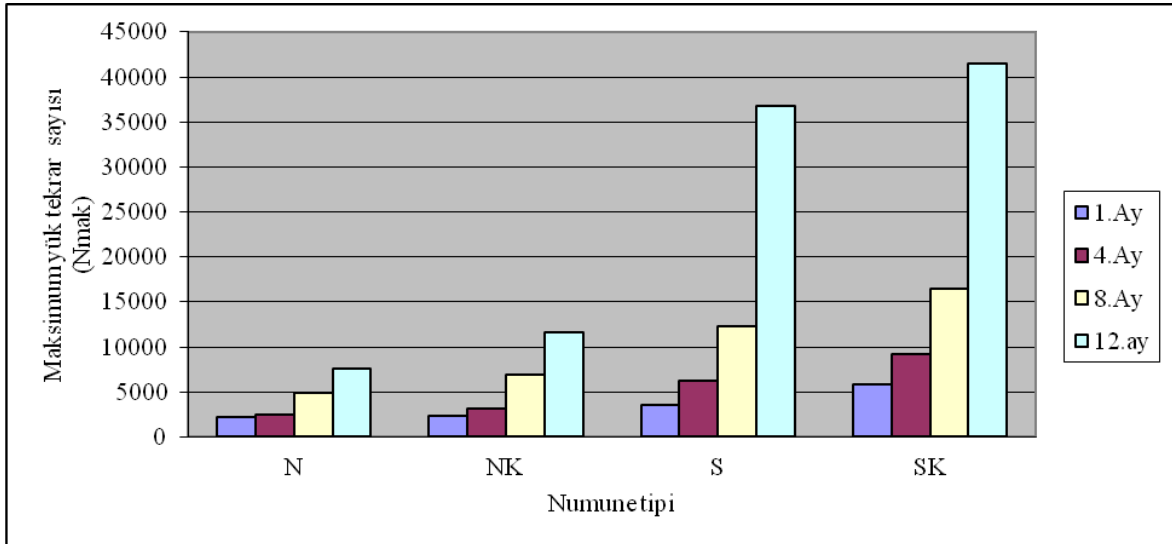


Şekil 7.92. Karot numunelerine ait 12. ay deformasyon-yük tekrar sayısı ilişkisi

Şekil 7.89 - Şekil 7.92 incelendiğinde, bir yıllık süre zarfındaki maksimum yük tekrar sayısında en fazla artış 12. ayda meydana gelmiştir. Numunelerin kırılması için gerekli yük tekrar sayısı SBS katkı kullanılması ile artmıştır. SBS katkılı numunelerde yorulma dayanımları katkısız numunelere göre önemli oranda artmaktadır. SBS kullanılması ile maksimum yük tekrar sayısındaki deformasyon miktarları azalmıştır. Bu durum, SBS içerikli numunelerin dayanabileceği yük tekrar sayısı artmasına rağmen BSK esnekliğinin azaldığını, dolayısıyla daha gevrek bir kırılmanın olduğunu göstermektedir. Karot numunelerinin bir yıllık zaman dilimine ait birinci ayında N ve NK tipi numunelerin

deformasyon miktarları hemen hemen aynı olup, NK tipi numunelerin N_{mak} değerleri daha büyük çıkmıştır. S ve SK tipi numunelerde ise S tipi olanların deformasyon miktarı SK tipine göre daha büyük çıkmıştır. En düşük deformasyon ve en büyük N_{mak} değeri SK tipi numunelere ait örneklerden elde edilmiştir. 4. ay karot numunelerinde deformasyon değerleri tüm numune tiplerinde birbirine yakın çıkıp, en fazla N_{mak} değeri SK tipi numune örneğinde görülmüştür. 8. ay numune örneklerine ait değerler incelendiğinde S ve SK tipi numunelerin 8000 yük tekrar sayısında deformasyon değerlerinin çakıştığı, en büyük N_{mak} değeri SK tipi numune örneklerinde elde edilip, deformasyon değerleri birbirine yakın çıkmıştır. 12. ay numune örneği incelendiğinde, katkısız numunelerin (N-NK) başlangıç yük tekrar sayısı ve deformasyon miktarlarının yakın değerlerde olduğu, SBS katkılı numunelerin (S-SK) yük tekrar sayısının belli aralıklarında deformasyon miktarlarının birbirine yakın değerde olduğu görülmüştür. En düşük deformasyon ve en büyük N_{mak} değerinin SBS katkılı SK tipi numune örneğinde saptanmıştır.

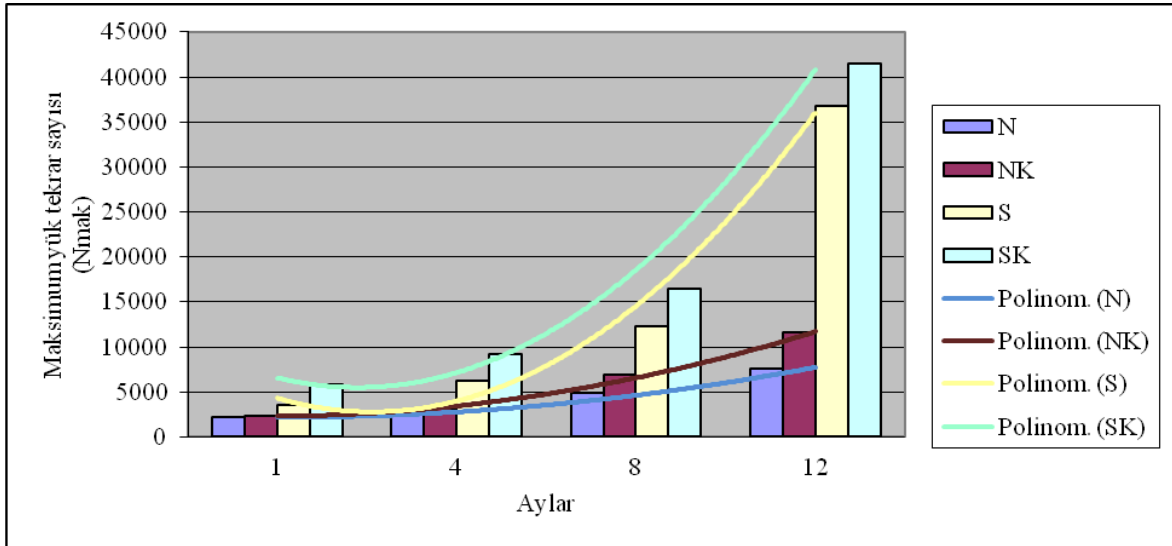
300 kPa gerilme seviyesinde her tip karışım numunesinden üçer adet olmak üzere elde edilen maksimum yük tekrar sayılarının (N_{mak}) ortalamasının numune tipine göre değişimi Şekil 7.93'te verilmiştir. Numune tiplerinin aylara göre değişimi ve eğilim çizgileri Şekil 7.94'te gösterilmiş, eğilim çizgisine ait denklem takımı ve korelasyon katsayısı Tablo 7.83'te sunulmuştur.



Şekil 7.93. Karot numuneleri yorulma deneyine ait N_{mak} değerlerinin numune tipine göre aylık değişimleri

Şekil 7.93 incelendiğinde, karot numunelerine ait yorulma deneyi maksimum yük tekrar sayısı (N_{mak}) bakımından katkılı BSK numunelerinin (S-SK), katkısız (N-NK) olanlara

göre daha büyük değerde olduğu, aylık periyotlardaki artışla birlikte karot numune değerlerinin de arttığı görülmektedir. NK tipi karot numunelerinin N tipine göre, SK tipi karot numunelerinin ise S tipindekilere göre daha büyük N_{mak} değerine sahip olduğu gözlenmiştir. En düşük N_{mak} değeri ortalaması 1. ay N tipinde 2256, en büyük N_{mak} değeri ortalaması ise 12. ay SK tipi karot numunelerinden 41464 olarak elde edilmiştir. Karışımda SBS kullanılması ile yorulma dayanımı değerlerinde meydana gelen artış, deney sıcaklıklarında SBS içeren karışımların saf karışıma göre daha rijit olacağını ve yüksek sıcaklıklarda tekerlek izi oluşumuna ve bozulmalara karşı BSK'ların dayanımını arttıracaklarını göstermektedir. Karot numunelerinin temin edildiği tekerlek geçiş bölgelerinin yorulma deneyi sonuçlarının N_{mak} değerlerinin yol kenarından temin edilenlere göre daha düşük değerde olduğu, katkısız olanlarda bu farkın daha düşük, SBS katkılı olanlarda ise daha yüksek değerde olduğu tespit edilmiştir. Bu bakımdan trafik yüküne maruz kalan BSK karot numuneleri yorulma deneyi N_{mak} değerlerinin, taşıt tekerlek yüküne maruz kalmayan yol kenarından temin edilen karot numunelerine göre daha düşük değerlerde olduğu saptanmıştır.



Şekil 7.94. Karot numuneleri yorulma deneyine ait N_{mak} değerlerinin aylık değişimleri ve eğilim çizgileri

Şekil 7.94'te, karot numunelerinin maksimum yük tekrar sayısı (N_{mak}) değerlerinin aylık değişimlere göre doğrusal olmayan bir şekilde artış gösterdiği, N_{mak} değişimlerinin 1. ayda en düşük, 12. ayda ise en büyük değerlerde olduğu belirlenmiştir. Aylık periyotlar bakımından 1. ve 4. aydaki karot numunelerinin N_{mak} artışlarının daha az olduğu

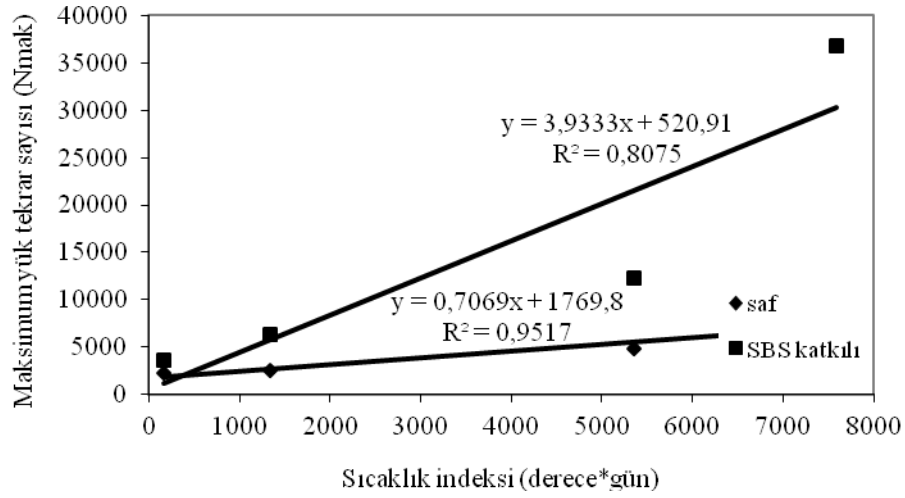
görülmüştür. En düşük N_{mak} değerleri katkısız N tipi karot numunelerinde olup, bir yıllık zaman periyodunda 3,388 kat artmıştır. NK tipi numunelerde görülen bir yıllık zaman periyodundaki N_{mak} değerleri yaklaşık 4,808 kat bir artış göstermiş, katkılı S tipi numuneler için 10,355 kat artış elde edilmiş ve en yüksek N_{mak} değerlerine sahip SK tipi numunelerde ise 7,036 katlık bir artış meydana gelmiştir. En düşük ve en yüksek N_{mak} değeri değişimleri olan N ve SK tipi karot numuneleri arasında en düşük N_{mak} değerleri olan 1. ayda %38,28 oranında bir fark, 12. ayda ise %18,44 oranında bir fark gözlenmiştir. Dolayısıyla karışımların kalıcı deformasyon ve yorulma çatlaklarına karşı dayanımları, SBS katkı kullanımıyla artmıştır.

Tablo 7.83'te verilen, bağımsız aylık periyotlardaki bağımlı N_{mak} parametrelerinden elde edilen fonksiyonlara ait belirtme katsayısı değerlerinin 1,0'e yakın olduğu, dolayısıyla içsel bir bağımlılığın ve kuvvetli bir ilişkinin olduğu görülmektedir.

Tablo 7.83. Karot numune tiplerine ait yorulma deneyi fonksiyonları ve belirtme katsayıları

Numune	Eğilim Çizgisi Fonksiyonu	R^2
N	$y = 623,5x^2 - 1264,5x + 2811,5$	0,9923
NK	$y = 994,75x^2 - 1841,7x + 3144,3$	0,9953
S	$y = 5431,5x^2 - 16590x + 15457$	0,9837
SK	$y = 5409x^2 - 15640x + 16803$	0,9882

Şekil 7.95'te sıcaklık indeksleri ile yorulma arasındaki ilişki sunulmuştur. Sıcaklık indeksleri ile N_{mak} arasında yüksek bir belirtme katsayısı ile doğrusal bir ilişkinin olduğu görülmüştür. Zaman içinde kaplamadaki sıcaklık indeksi değerlerindeki artış ile kaplamanın esnekliği azalarak rijitliği artmış ve dolayısıyla yorulma ömrü artmıştır. Kaplamanın zaman içinde trafiğin neden olduğu sürekli tekerlek yüklerine maruz kalması mikro hasarlara yol açmaktadır. Yorulma çatlağı zaman içinde tekrar eden yükler sonucu kademeli olarak artacaktır.

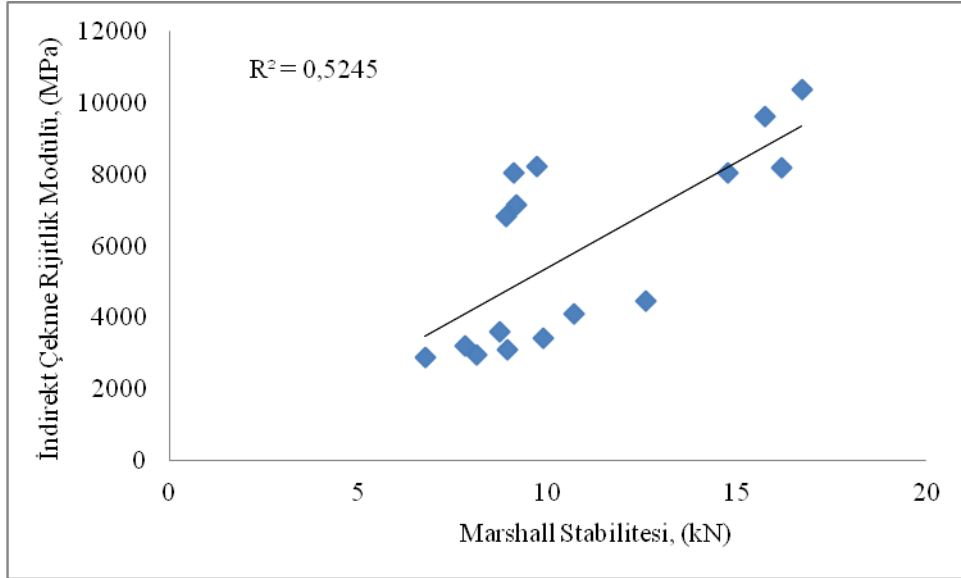


Şekil 7.95. Yorulma ile sıcaklık indeksi ilişkisi

7.2.8. Karot Numunelerine Ait Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması

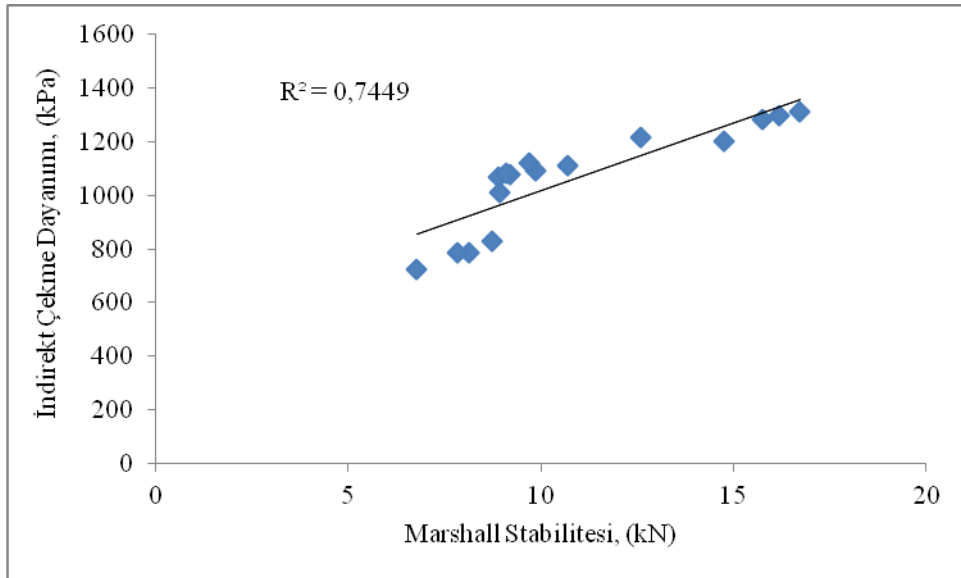
Katkısız ve SBS katkılı BSK aşınma tabakasından temin edilen karot numuneleri üzerinde, performans karakteristiklerini belirlemek amacıyla performans deneyleri uygulanmış ve elde edilen Marshall stabilitesi, indirekt çekme dayanımı, indirekt çekme rijitlik modülü, indirekt çekme yorulma deney sonuçlarının birbirleriyle olan altılı kombinasyonu alınarak, meydana gelen değişimlerin karşılaştırması yapılmıştır. Bir yıllık süre zarfında 3 aylık zaman dilimlerinde 4 farklı periyotta meydana gelen performans deneylerine ait sonuçların değişimlerinin karşılaştırması ile elde edilen fonksiyon denklemleri ve belirtme katsayıları hesaplanarak birbirleriyle uyumlu olup olmadıkları incelenmiştir.

Karot numuneleri deney sonuçları Şekil 7.96 - Şekil 7.101'de karşılaştırılmış, fonksiyon ve belirtme katsayıları Tablo 7.84'te sunulmuştur.



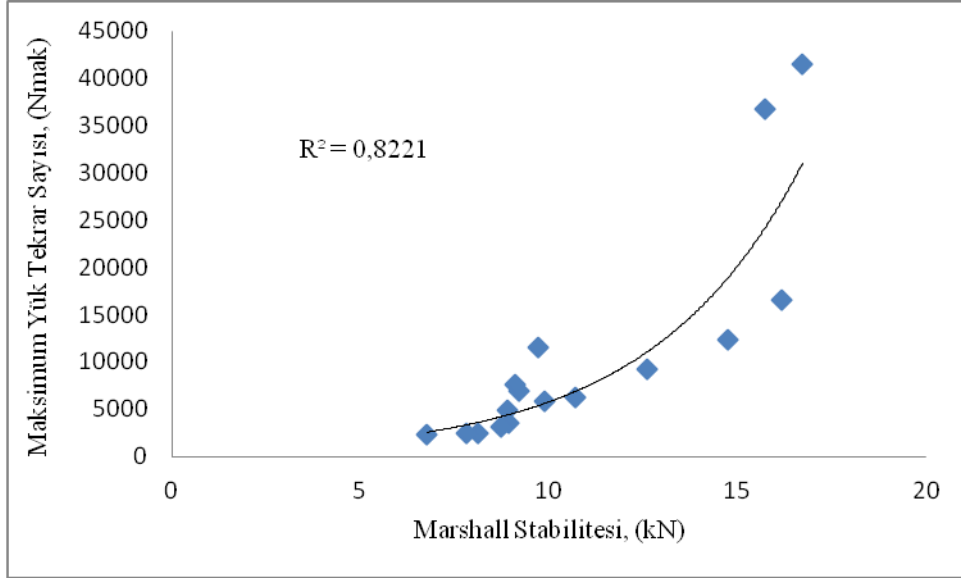
Şekil 7.96. Karot numunelerinin Marshall stabilitesi-indirekt çekme rijitlik modülü deney sonuçlarının karşılaştırılması

Şekil 7.96 incelendiğinde; karot numunelerinin Marshall stabilitesi - ITSM değerleri arasındaki eğilim çizgisi denkleminin doğrusal olup, belirtme katsayısı bakımından diğer deneyler arasındaki ilişkilere göre zayıf bir bağ mevcuttur.



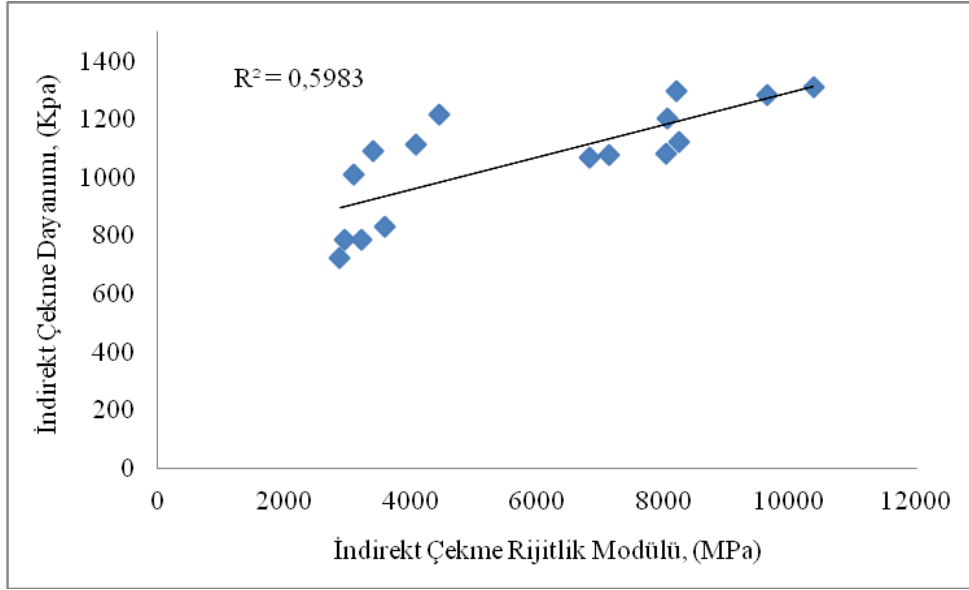
Şekil 7.97. Karot numunelerinin Marshall stabilitesi-indirekt çekme dayanım deney sonuçlarının karşılaştırılması

Şekil 7.97'ye göre; karot numunelerinin Marshall stabilitesi - ITS değerlerinin eğilim çizgisi denklemi olarak doğrusal ve belirtme katsayısı değeri 1'e yakın olduğundan, değerler arasında kuvvetli bir bağ görülmektedir.



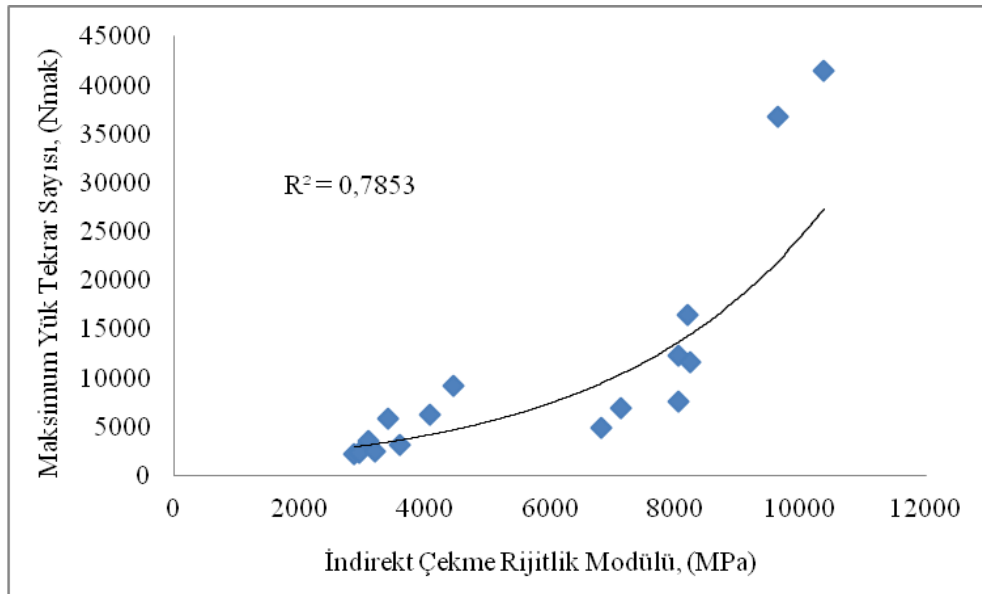
Şekil 7.98. Karot numunelerinin Marshall stabilitesi-yorulma deney sonuçlarının karşılaştırılması

Şekil 7.98'de görüldüğü gibi; BSK karot numunelerinin Marshall stabilitesi- N_{mak} değerlerinin eğilim çizgisi fonksiyonu üstel değişim şeklinde artış göstermiş, belirtme katsayısı 1'e yakın çıktığından, bağımlı değişkenler arasında kuvvetli bir ilişkinin olduğu görülmektedir.



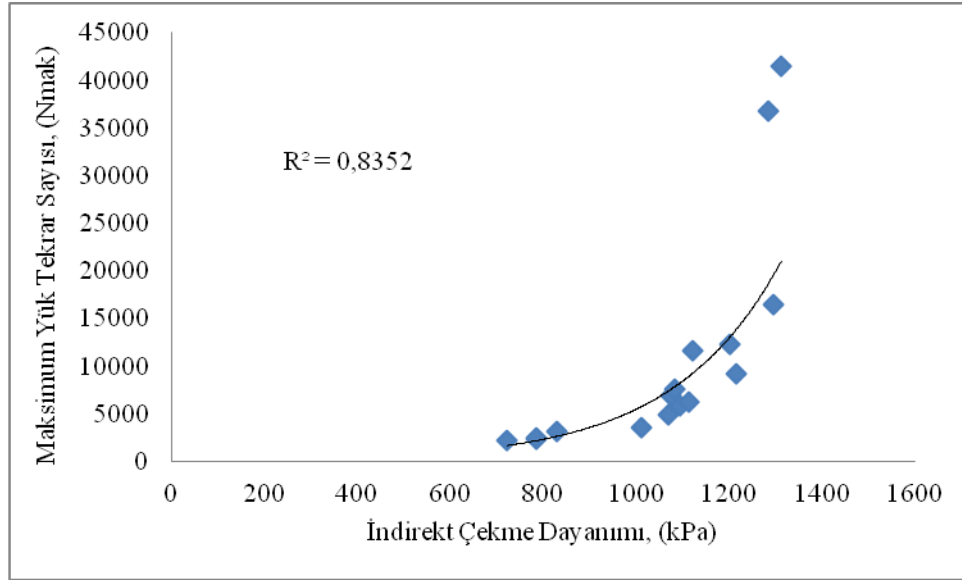
Şekil 7.99. Karot numunelerinin indirekt çekme rijitlik modülü-indirekt çekme dayanımı deney sonuçlarının karşılaştırılması

Şekil 7.99'daki grafik incelendiğinde; BSK karot numunelerinin eğilim çizgisi fonksiyonu doğrusal değişim göstermektedir. Tüm karot tiplerinde ITSM - ITS bağımlı değişkenleri arasında belirtme katsayısı değeri diğer deneyler arasındaki ilişkilere göre zayıf bir bağ oluşturmuştur.



Şekil 7.100. Karot numunelerinin indirekt çekme rijitlik modülü - indirekt çekme yorulma deneyi sonuçlarının karşılaştırılması

Karot numunelerinin ITSM ve yorulma deneyi N_{mak} değerleri arasındaki ilişki Şekil 7.100’de görülmektedir. Eğilim çizgisi denklemi üstel fonksiyon şeklindedir. Bağımlı değişkenlere ait parametreler arasında belirtme katsayısı değeri 1’e yakın olduğundan kuvvetli bir ilişki mevcuttur.



Şekil 7.101. Karot numunelerinin indirekt çekme dayanımı-indirekt çekme yorulma deneyi sonuçlarının karşılaştırılması

Şekil 7.101’de karot numunelerin ITS ve yorulma deneyi değerleri arasındaki ilişki gösterilmiştir. Karot numunelerine ait eğilim çizgisi denklemi incelendiğinde, üstel fonksiyon şeklinde bir değişim gösterdiği görülmektedir. Eğilim çizgisi denklemleri bakımından tüm karot numune tiplerine göre ITS- N_{mak} arasındaki belirtme katsayısı değeri (0-1) arasında yüksek değerde olduğundan aralarında kuvvetli bir ilişki mevcuttur.

Tablo 7.84. Karot numuneleri denklem takımı ve belirtme katsayıları

Deney karşılaştırması	Eğilim Çizgisi Denklemi	R^2
Stabilite-ITSM	$y = 592,28x - 543,82$	0,5245
Stabilite-ITS	$y = 50,475x + 514,63$	0,7449
Stabilite-Yorulma	$y = 472,76e^{0,2501x}$	0,8221
ITSM-ITS	$y = 0,0553x + 737,18$	0,5983
ITSM-Yorulma	$y = 1230,3e^{0,0003x}$	0,7853
ITS-Yorulma	$y = 73,268e^{0,0043x}$	0,8352

8. SONUÇ ve ÖNERİLER

Tez çalışmasında, katkı malzemesi olarak Stiren-Butadien-Stiren (SBS) kullanılmış ve trafik yükü altında BSK'lardaki (BSK) davranışlarının mühendislik özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla çalışmaların yürütülmesi için bir yol güzergahı hazırlanarak elde edilen BSK karışımlarla iki farklı tipte asfalt betonu kaplama tabakaları oluşturulmuştur. Farklı tipteki BSK'ların laboratuvar deney sonuçları ile uygulama sahasında temin edilen numunelerin fiziksel ve mekanik özellikleri incelenmiştir. SBS katkısı %5 oranında kullanılmış, elde edilen sonuçlar saf karışımla karşılaştırılmıştır. Deneyler arazi ve laboratuvar deneyleri olmak üzere iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Deney çalışmalarında, İstanbul İli Küçükçekmece İlçesi Yarımburgaz Mahallesi'ndeki lokal bir alanda asfalt betonu kaplama uygulanarak, bu alandaki çalışmalardan faydalanılmıştır.

Arazi deneylerinde ilk olarak yol güzergahından geçen bir yıllık periyottaki araç sayıları ve yol yüzeyi ile hava sıcaklıkları trafik ölçüm cihazı kullanılarak belirlenmiştir. Bunun yanında bir yıllık periyottaki tekerlek izi ölçümleri, Schmith çekici ile yüzey sertliği ölçümü, Troxler cihazıyla yapılan nükleer yoğunluk ölçüm yöntemi uygulanmıştır. Ölçümler, yol kenarlarında ve tekerlek geçiş bölgelerinde iki farklı tipteki BSK yol güzergahında yapılmıştır.

Bu çalışmada aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

1) Laboratuvarlarda yürütülecek deneysel çalışmalarla ilgili ilk olarak BSK'da kullanılacak agregalar, saf ve modifiyeli bitümlerin fiziksel özelliklerine yönelik deneyler yürütülmüş ve elde edilen sonuçların şartname limitlerinde kaldığı görülmüştür.

2) Arazide yola yerleştirilen sıcaklık ölçer sayesinde özellikle yüksek hava sıcaklıklarında kaplama sıcaklığı ile hava sıcaklığı arasındaki farkın önemli derecede arttığı, normal karışım ile SBS modifiyeli karışım sıcaklıkları arasında ise 2°C bir farkın olduğu tespit edilmiştir. Tekerlek izi derinliği ölçümlerinde, katkısız BSK'lardaki tekerlek izi ölçümleri ortalama değeri, SBS katkılı sıcak karışımlardaki tekerlek izi ölçüm ortalamasına göre yaklaşık %50 daha fazla olduğu görülmüştür. Yüzey sertliği ölçüm deneyinde ise bir yıllık periyotta yüzey sertliklerinin arttığı görülmüş, artış miktarı yol kenar bölgesine ait SBS katkılı BSK'larda ve tekerlek geçiş bölgesi katkısız BSK'larda daha fazla olduğu görülmüştür.

3) Laboratuvarda hazırlanan saf ve katkılı BSK Marshall briketlerinde uygulanan performans özellikleriyle ilgili deneylerde SBS katkılı numunelere ait Marshall stabilitesi, indirekt çekme dayanımı, indirekt çekme rijitlik modülü ve yorulma deneyi sonucunda elde edilen değerlerin katkısız numunelere göre daha büyük değerlerde olduğu görülmüştür.

4) Bir yıllık süre zarfında üç aylık periyotlarda temin edilen karot numuneleri üzerinde yapılan laboratuvar deney çalışmalarında hacimsel parametrelere ait özgül ağırlık, hava boşluğu ve agregalar arası boşluk yüzdesi değerlerinin, hem yol kenarı hem de tekerlek geçiş bölgesi katkısız ve SBS katkılı kontrol numunelerinde azaldığı, asfaltla dolu boşluk yüzdesinin ise arttığı tespit edilmiştir. Tekerlek geçiş bölgelerindeki hacimsel parametrelerdeki değişimler, yol kenar bölgesine göre daha fazla çıkmıştır.

5) Karot numunelerinin performans özellikleriyle ilgili yapılan deneysel çalışmalarda indirekt çekme dayanımı, indirekt çekme rijitlik modülü ve yorulma deneylerinde, katkılı BSK numunelerinin katkısız olanlara göre daha büyük değerlerde olduğu, aylık periyotlardaki artışla birlikte karot numunelerinin ITS, ITSM ve N_{mak} değerlerinde artışlar meydana geldiği görülmektedir. Bu durumun kaplamanın maruz kaldığı çevre şartları nedeniyle zaman içerisinde sertleşmesinden kaynaklanması olarak düşünülmektedir. NK tipi karot numunelerinin N tipine göre, SK tipi karot numunelerinin ise S tipindekilere göre daha büyük değerlerde olduğu görülmüştür. Bunun nedeninin kenar bölgesinde yolun enine eğiminden dolayı daha fazla suya maruz kalarak sertleşmesi olarak düşünülmektedir.

Genel olarak BSK'larda SBS katkı kullanılmasının, yapılan deneysel çalışmalarının sonucunda, performans özellikleri bakımından daha iyi sonuç verdiği ve avantaj sağladığı görülmüş ayrıca bir yıllık zaman dilimi içinde katkısız ve katkılı kaplamaların çevre şartlarından ne derecede etkilendiği tespit edilmiştir.

Çalışma, düşük trafik yoğunluğunun olduğu bir güzergah boyunca yürütülmüştür. Dolayısıyla trafik yüklerinin asfalt kaplamalarına etkilerinin daha net bir şekilde anlaşılabilmesi için bundan sonraki çalışmalarda yoğun trafiğin olduğu güzergahlarda çalışmaların yürütülmesi gerekmektedir. Ayrıca daha farklı çevre koşullarına sahip gece ve gündüz sıcaklık farkı ile düşük ve yüksek sıcaklık değerlerinin arasındaki farkın fazla olduğu karasal iklime sahip alanların seçilmesi, çalışma kapsamını genişletmesi için önerilmektedir. BSK asfalt kaplamalardaki çevre ve iklim koşullarının etkilerinin uzun süreli zaman periyotlarında incelenmesi asfaltın fiziksel ve mekanik özelliklerinin belirlenmesinde daha kalıcı sonuçlar verebilir. Ayrıca tez çalışmasında uygulanamayan

dinamik sünme veya tekerlek izi deneylerinin farklı karışım lar üzerinde uygulanması ve arazi sonuçları ile karşılaştırılması çalışmanın daha ileri bir seviyesini oluşturabilir.

Kaynaklar

- [1] **Uluçaylı, M.**, 1998. Modifiye Bitüm ve Modifikasyon Katkılarının Kullanımı, *II.Ulusal Asfalt Sempozyumu*, 15-29.
- [2] **Lu, X. and Isacson, U.**, 2000. Laboratory Study on the Low Temperature Physical Hardening of Conventional and Polymer Modified Bitumens, *Construction and Building Materials*, 14, 79-88.
- [3] **Navarro, F.J., Partal, P., Martinez-Boza, F., Valencia, C. and Gallegos, C.**, 2002. Rheological Characteristics of Ground Tire Rubber-Modified Bitumens, *Chemical Engineering Journal*, 89, 53-61.
- [4] **Airey, G.D.**, 2002. Rheological Properties of Styrene Butadiene Styrene Polymer Modified Road Bitumens, *Fuel*, Volume 82, Issue 14, 1709- 1719.
- [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] **Khattak, M.J. and Baladi, G.Y.**, 1998. Engineering Properties of Polymer – Modified Asphalt Mixtures, *Transportation Research Record*, 1638, 12-22.
- [7] **Weidong, C.**, 2007. Study on Properties of Recycle Tire Rubber Modified Asphalt Mixtures Using Dry Process, *Construction and Building Materials*, 21, 1011-1015.
- [8] **Kuloğlu, N., Karakaş, A.S., Kök, B.V. ve Yılmaz, M.**, 2013. Bitümlü Sıcak Karışımlarda Katkı Kullanımının Değerlendirilmesi, *6. Mühendislik ve Teknoloji Sempozyumu*, Çankaya Üniversitesi, Ankara, syf. 73-77.
- [9] **Jiang, Z.Y.**, 2005. The Status and Development of Waste Tire Sources Recycling in China, *Chinaire Resource Recycling*, Chine, p. 6–8.
- [10] Sacramento County Department of Environmental Review and Assessment, 1999. Report on the status of rubberized asphalt traffic noise reduction in Sacramento county, pp. 3–5.
- [11] **Sarsam, S.I. and Abdulmawjod, A.A.**, 2008. A Comparative Study of Roller and Hammer Compacted Asphalt Concrete, *International Journal of Engineering Technology*, Vol. 26, No. 5.
- [12] **Takallou, H.B., Hicks, R.G. and Esch, D.C.**, 1986. Effect of Mix Ingredient on the Behavior of Rubber Modified Asphalt Mixture, *TRR*, No. 1096.
- [13] **Hussain, M.H.M., Ghaly, N.F. and Ibrahim, I.M.**, 2008. Modified Hot Mix Asphalt for Road Maintenance, *World Applied Sciences*, Journal 5 (2): 236-245.
- [14] **Mohamed, A.A., Hamzah, M.O., Ismail, H. and Omar, H.**, 2009. Rheological Properties of Crumb Rubber-Modified Bitumen Containing Antioxidant, *The Arabian Journal for Science and Engineering*, Volume 34, Number 1B, 3-12.
- [15] **Deniz, M.T., Sönmez, İ. ve Yıldırım, S.A.**, 2005. Eren B.K., Kullanılmış Otomobil Lastiklerinin Bitümlü Sıcak Karışım Performansına Etkisi, *6. Ulaştırma Kongresi*, İstanbul, 349-364.
- [16] **Wang, J.C. and Zeng, X.**, 2006. Influence of Temperature and Pressure on the Dynamic Properties of Rubber-Modified Asphalt, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 18 (1): 125-131.

- [17] **Navarro, F.J., Partal, P., Martinez-Boza, F. and Gallegos, C.,** 2004. Thermo-Rheological Behaviour and Storage Stability of Ground Tire Rubber-Modified Bitumens, *Fuel*, 83 (14-15): 2041-2049.
- [18] **Hernandez, O.F., Witoszek, S.B., Alonso, F.M. and Moro, C.B.,** 2009. Rubber-Modified Hot-Mix Asphalt Pavement by Dry Process, *International Journal of Pavement Engineering*, 10 (4): 277-288.
- [19] **Çelik, O.N.,** 2001. Öğütülmüş Atık Otomobil Lastiğiyle Modifiye Edilmiş Bitümler İle Yapılan Asfalt Betonunun Yorulma Davranışı, *Turk J. Engin. Environ. Sci.*, 25, pp. 487-495.
- [20] **Sibal, A., Das, A. and Pandey, B.B.,** 2000. Flexural Fatigue Characteristics of Asphalt Concrete with Crumb Rubber, *Journal of Pavement Engineering*, 1 (2): 119-132.
- [21] **Thompson, P.D.,** 1964. Full-Scale Road Experiments Using Rubberised Surfacing Materials, *Road Research Technical*, paper No.71, HMSO, London.
- [22] **Bathune, A.,** 1978. Use of Rubber in Bituminous Surfacing, *ARRB Proceedings*, No. 9, Part-3, pp. 157-170.
- [23] **Gupta, A.K.,** 1997. Rubberised Roads-A CRRI Experience, Indian Highways, *Indian Roads Congress*, 25 (4): 157-170
- [24] **Lee, S.J. and Amirkhanian, S.N.,** 2007. Laboratory Study of The Effects of Compaction on the Volumetric and rutting properties of CRM asphalt mixtures, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 19 (12): 1079-1089.
- [25] **Mull, M.A., Stuart, K. and Yehia, A.,** 2002. Fracture Resistance Characterization of Chemically Modified Crumb Rubber Asphalt Pavement, *Journal of Materials Science*, Vol. 37, pp. 557-566.
- [26] **Isacsson, U. and Lu, X.,** 1995. Testing and Appraisal of Polymer Modified Road Bitumens - State of the Art., *Material& and Structure.*, Vol. 28, pp. 139-159.
- [27] **Little, D.N., Button, J.W., White, R.M., Ensley, E.K., Kim, Y. and Ahmed, S.,** 1986. Investigation of Asphalt Additives, Report No. FHWA RD-871001, *U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration.*
- [28] **Btile, B., Brion, Y., and Tanguy, A.,** 1988. Paveming Asphalt Polymer Blends: Relationships Between Composition, Structure And Properties, *Proc. Association of Asphalt Paving Technologist*, Vol. 57, pp. 41-64.
- [29] **Collins, J. H., Bouldin, M. G., Gelles, R. and Berker, A.,** 1991. Improved Performance of Paving Asphalts by Polymer Modification, *Prw. Association of Asphalt Paving Technologists*, 60, 43-79.
- [30] **King, G.N., King, H.W., Harders, O., Chavenot, P. and Planche, J.P.,** 1993. Influence of Asphalt Grade and Polymer Concentration on the Low Temperature Performance of Polymer Modified Asphalt, *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 61, 29-66.
- [31] **Bull, A.L. and Vonk, W.C.,** 1987. Thermoplastic Rubber/Bitumen Blends for Roof and Road, *Shell Technical Manual*, TRX., 1.5.
- [32] **Valkering, C.P., Vonk, W.C. and Whiteoak, C.D.,** 1992. Improved Asphalt Properties Using Sbs Modified Modified Bitumens, *Shell Bitumen*, Review, 66, 9-11.
- [33] **Holden, G., Kricheldorf, H.R. and Quirk, R.P.,** 2004. Thermoplastic Elastomers, Hanser, 3rd. Edition.

- [34] **Bowering, R.H.**, 1984. Modified Bitumens., *In AAPA Confer.*, Hobart, Tasmania., pp. 27-28.
- [35] **Mathais, H. and Sauterey, R.**, 1993. Unmodified and Modified Bitumens-Properties and Characterization, *In Proc. of 5th Eumhizumr Congre.*, Vol. II, pp. 1-39.
- [36] Preparing Blends of CARIFLEX TR and Bitumens, 1991. *Shell Technical Bulletin TR 6.5*, Shell Chemical Company, Houston, Texas.
- [37] **Subagio, B.S., Kosasih, D., Busnial and Tenrilangi, D.**, 2005. Development of Stiffness Modulus And Plastic Deformation Characteristics of Porous Asphalt Mixture using Tafpack Super, *Proceedings of Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 5, 803–812.
- [38] **Saez-alvan, L.D.P., Bernucci, L.B., and Moura, E.**, 2003. Mechanical Behavior of Asphalt Mixtures in Regions of Low Temperature and Altitude Above 3800 meters, *International Conference Airports: Planning, Infrastructure & Environment*, Rio De Janeiro, R.J., Brazil, 8 – 11.
- [39] **Catt, O.V.**, 2004. Investigation of Polymer Modified Asphalt by Shear and Tensile Compliances Material Characterization for Inputs into AASHTO 2002 Guide Session of the 2004, *Annual Conf. Transportation Assoc.*, Québec City, Canada.
- [40] **Copplantz, J.S., Margot, T.Y. and Fred, N.F.**, 1993. Review of Relationships Between Modified Asphalt Properties and Pavement Performance, SHRP-A-631, Strategic Highway Research Program, National Research Council Washington, USA., 81.
- [41] **Newman, K.**, 2004. Polymer-Modified Asphalt Mixtures for Heavy-Duty Pavements: Fatigue Characteristics as Measured by Flexural Beam Testing, *FAA Worldwide Airport Technol. Transfer Conf.*, Atlantic City, New Jersey, USA.
- [42] **Kim, M.G., Button, J.W. and Park, D.W.**, 1999. Coatings to Improve Low Quality Local Aggregates for Hot Mix Asphalt Pavements, SWUTC / 99 / 167405 - 1, *Texas Transportation Institute*, Texas A&M Univ.
- [43] **Hansen, K.R., McGennis R.B., Prowell B. and Stonex A.**, Current and Future Use of Non-bituminous Components of Bituminous Paving Mixtures, A2D02: Committee on Characteristics of Non-bituminous Components of Bituminous Paving Mixtures, Onlinepubs.trb.org/onlinepubs/millennium/00079.pdf
- [44] **Behbahani, H., Ziari, H. and Noubakhat, S.**, 2008. The Use of Polymer Modification of Bitumen for Durant Hot Asphalt Mixtures, *Journal of Applied Sciences Research*, 4(1): 96-102.
- [45] **Awwad, M.T. and Shbeeb, L.**, 2007. The Use of Polyethylene in Hot Asphalt Mixtures, *American Journal of Applied Sciences*, 4 (6), 390-396.
- [46] **Airey, G.D.**, 2004. Styrene Butadiene Styrene Polymer Medication of Road Bitumens, *Journal of Materials Science*, 99, 951–99.
- [47] **Becker, Y., Mendez, M.P. and Rodriguez, Y.**, 1999. Polymer Modified Asphalt, *Wisconsin Technology*, 9 (1): 39–50.
- [48] **Wambura, L., Maina, J., and Smith, H.**, 1999. Kenya Asphaltic Materials Study, *78. Annual Meeting of Transportation Research Board*, Washington D.C.
- [49] **Sengoz, B. and Isikyakar, G.**, 2008. Evaluation of the Properties and Microstructure of SBS and EVA Polymer Modified Bitumen, *Construction and Building Materials*, 22, 1897-1905.

- [50] **Tayfur, S., Ozen, H. and Aksoy, A.,** 2007. Investigation of Rutting Performance of Asphalt Mixtures Containing Polymer Modifiers, *Construction and Building Materials*, 21, 328-337.
- [51] **Lu, X. and Isacson, U.,** 1997. Rheological Characterization Stryene of Styrene-Butadiene-Styrene Copolymer Modified Bitumens, *Construction and Building Materials*, 11 (1): 23-32.
- [52] **Hussein, I.A., Iqbal, M.H. and Al-Abdul Wahhab, H.I.,** 2005. Influence of Mw of LDPE and Vinyl Acetate Content of EVA on the Rheology of Polymer Modified Asphalt , *Rheologica Acta*, 45, 92–104.
- [53] **Hussein, I.A., Hameed, T., Abu Sharkh, B.F. and Mezghani, K.,** 2003. Miscibility of Hexene-LLDPE and LDPE Blends: Rheological Study of the Influence of Branch Content and Composition Distribution, *Polymer*, 44, 4665–4672.
- [54] **Hussein, I.A., Ho, K., Goyal, S.K., Karbashewski, E. and Williams, M.C.,** 2000. Thermomechanical Degradation in the Preparation of Polyethylene Blends, *Polymer Degradation Stability*, 68, 381–392.
- [55] **Hussein, I.A., Wahhab, H.I. and Iqbal, M.H.,** 2006. Influence of Polymer Type And Structure on Polymer Modified Asphalt Concrete Mix, *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, Volume 84, 480-487.
- [56] **Goodrich, J.L.,** 1988. Asphalt and Polymer Modified Asphalt Properties Related to the Performance of Asphalt Concrete Mixes, *Asphalt Paving Technology*, 57, 116–175.
- [57] **Anderson, R.M., Walker, D. E. and Turner, P.A.,** 1999. Low-Temperature Evaluation of Kentucky Performance-Graded 70-22 Asphalt Binders, *Transportation Research Record*, No. 1661, 69–74.
- [58] **Panda, M., and Mazumder, M.,** 2002. Utilization of Reclaimed Polyethylene in Bituminous Paving Mixes, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 14, 527–530.
- [59] **Chen, J.S. and Lin, K.Y.,** 2004. Effects of Crack Width and Permeability on Moisture-Induced Damage of Pavements, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 16, 276–282.
- [60] **Hansen, K.R. and Anderton, G.,** 1993. A Laboratory Evaluation of Recycled Tire Rubber in Hot-Mix Asphalt Paving Systems, *ASTM Special Tech. Pub.*, STP 1193, 69–83.
- [61] **Parker, F. and Brown, E.R.,** 1992. Effects of Aggregate Properties on Flexible Pavement Rutting in Alabama, *ASTM Special Technical Publication*, STP 1147, 68–89.
- [62] **Perdomo, C., Button, J.W. and Lytton, R.L.,** 1992. A New Approach for Prediction of Permanent Deformation, *ASTM Special Technical Publication*, STP 1147, 295–309.
- [63] **Zoorob, S.E. and Suparma, L.B.,** 2000. Laboratory Design and Investigation of the Properties of Continuously Graded Asphaltic Concrete Containign Recycled Plastics Aggregate Replacement (Plastiphalt), *Cement and Concrete Composites*, 22, 233–242.
- [64] **Zhou, H., Nodes, S.E. and Nichols, J.E.,** 1997. Evaluation of Three Polymer Modified Asphalt Concretes, *Transportation Research Record* No.1454, 181–192.
- [65] **Amirkhanian, S.N. and Williams, B.,** 1993. Recyclablity of Moisture Damaged Flexible Pavements, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 5, 510–530.

- [66] **Berthelot, C.F., Allen, D.H. and Searcy, C.R.,** 2003. Method for Performing Accelerated Characterization of Viscoelastic Constitutive Behavior of Asphalt Concrete, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 15, 496–505.
- [67] **Krishnan, J.M. and Rao, C.L.,** 2001. Permeability and Bleeding of Asphalt Mixture using Theory, *International Journal of Engineering Science*, 39, 611–627.
- [68] **Murphy, M., O'Mahony, M., Lycett, C. and Jamieson, I.,** 2001. Recycled Polymers for Use as Bitumen Modifiers, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 13, 306–314.
- [69] **Yılmaz, M., ve 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.*, 23 (4): 811-819.
- [70] **Ahmedzade, P. ve Yılmaz, M.,** 2007. Stiren-Butadien-Stiren Modifikasyonunun Bitümlü Bağlayıcıların Isı Duyarlılığı, Rijitlik ve Yaşlanma Özellikleri Üzerindeki Etkisi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 11 (3): 232-238.
- [71] **Mulder, E.A. and Whiteoak, C.D.,** 1992. An Objective Assessment of the In-Service Performance Of Thermoplastic Rubber Modified Bitumens for Road Applications, *Proceedings, 16th Arrb Conference*, Perth, Western Australia, Volume 16, Part 2, pp.309-334.
- [72] **Vonk, W.C., Phillips, M.C. and Roele, M.,** 1993. Ageing Resistance of Bituminous Road Binders: Benefits of SBS Modification, *Proceedings of 5th Eorobitume Congress*, Stockholm, IA, 156-160.
- [73] **Hınısloğlu, S. and Açar, E.,** 2003. Use Of Waste High Density Polyethylene As Bitumen Modifier in Asphalt Concrete Mix, *Elsevier B.V.*
- [74] **Vasudevan, R., Nigam, S.K., Velkennedy, R., Sekar, A.R.C. and Sundarakannan, B.,** 2007. Utilization of Waste Polymers for Flexible Pavement and Easy Disposal of Waste Polymers, *Proceedings of the International Conference on Sustainable Solid Waste Management*, 5 – 7, Chennai, India, pp. 105-111.
- [75] **Kumar, P., Chandra, S. and Bose, S.,** 2006. Strength Characteristics of Polymer Modified Mixes, *The International Journal of Pavement Engineering*, Vol. 7, No. 1, 63-71.
- [76] **Lu, X., Isacsson, U. and Ekblad, J.,** 1998. Low-Temperature Properties Of Styrene-Butadiene-Styrene Polymer Modified Bitumens, *Construction and Building Materials*, 12, 405-414.
- [77] **Haiying, F., Leidong, X., Daying, D., Li, L., Yu, M., and Yao, S.,** 2007. Storage Stability And Compatibility Of Asphalt Binder Modified By Sbs Graft Copolymer, *Construction and Building Materials*, 21 (7): 1528-1533.
- [78] **Von Quintus, H.L., Mallela, J. and Buncher, M.,** 2007 .Quantification of Effect Of Polymer-Modified Asphalt On Flexible Pavement Performance, *Transportaion Research Record*, Issue 2001, pp. 141-154.
- [79] **Zhao, D.J., Lei, M.J. and Yao, Z.K.,** 2009. Evaluation of Polymer-Modified Hot-Mix Asphalt: Laboratory Characterization, *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 21, pp. 163-170.
- [80] **Zubeck, H., Raad, L., Saboundjian, S., Minassian, G. and Ryer, J.,** 2002. Performance of Polymer Modified Asphalt-Aggregate Mixture in Alaska, *Journal of Cold Regions Engineering*, 16 (4): 170-190.

- [81] **Christensen, D., Motamed, A., Bahia, H.U. and Delgadillo, R.,** 2009. Performance of Modified Asphalt Binder and Mixtures Under Increased Truck Loading Limits, *Effecient Transportation and Pavement Systems: Characterization, Mechanisms, Simulation and Modeling*, pp. 421-439.
- [82] **Archilla, A.R., Kobayashi, L.D. and Diaz, L.G.,** 2008. Using Permanent Deformation Tests and the MEPDG to Quantify Permanent Deformation Improvements from Modified Binders, *Journal of The Association of Asphalt Paving Technologists*, Vol. 77, pp. 1005-1035.
- [83] **Woo, W.J., Hilbrich, J.M. and Glover, C.J.,** 2007. Loss of Polymer-Modified Binder Durability with Oxidative Aging-Base Binder Stiffening Versus Polymer Degradation, *Transportation Research Record*, Issue 1998, pp. 38-46.
- [84] **Kuloğlu, N., Karakaş, A.S., Kök, B.V. ve Yılmaz, M.,** 2013. Bitümlü Sıcak Karışımların Arazi Performanslarının Değerlendirilmesi, *10.Ulaştırma Kongresi*, İzmir, 131-140.
- [85] **Saoula, S., Mokhtar, K.A., Haddadi, S. and Ghorbel, E.,** 2008. Improvement of the Stability of Modified Bituminous Binders within EVA, *International Journal of Applied Engineering Research*, 3 (4):575-584.
- [86] **Wen, G., Zhang, Y., Zhang, Y., Sun, K. and Fan, Y.,** 2002. Rheological Characterization of Storage-Stable SBS-Modified Asphalts, *Polymer Testing*, 21, 295-302.
- [87] **Syroezhko, A.M., Begak, O.Y., Fedorov, W. and Gusarova, E.N.,** 2003. Modification of Paving Asphalts with Sulfur, *Russian Journal of Applied Chemistry*, 76 (3): 491-496.
- [88] **Kok, B.V. and Kuloglu, N.,** 2007. The Effects of Different Binders on Mechanical Properties of Hot Mix Asphalt, *International Journal of Science Technology*, 2 (1): 41-48.
- [89] **Lu, X. and Redelius, P.,** 2007. Effect of Bitumen Wax on Asphalt Mixture Performance, *Construction and Building Materials* , 21, 1961-1970.
- [90] **Lu, X., Kalman, B. and Redelius, P.,** 2008. A New Test Method for Determination of Wax Content in Crude Oils Residues and Bitumens, *Fuel*, 87 (8-9): 1543-1551.
- [91] **Musser, B.J. and Kilpatrick, P.K.,** 1998. Molecular Characterization of Wax Isolated from a Variety of Crude Oils. *Energy Fuels*, 12 (4): 715–25.
- [92] **Kane, M., Djabourov, M., Volle, J.L., Lechaire, J.P. and Frebourg, G.,** 2003. Morphology Of Paraffin Crystals In Waxy Crude Oils Cooled In Quiescent Conditions And Under Flow, *Fuel*, 2, 127–35.
- [93] **Carbognani, L., Delima, L., Orea, M. and Ehrmann, U.,** 2000. Studies of Large Crude Oil Alkanes, II. Isolation and Characterization of Aromatic Waxes and Waxy Asphaltenes, *Petroleum Science and Technology*, 18 (5-6): 607–34.
- [94] **Redelius, P., Lu, X. and Isacsson, U.,** 2002. Non-Classical Wax in Bitumen, *International Journal of Road Materials Pavement Design*, 3 (1): 7–21.
- [95] **Edwards, Y., Tasdemir, Y. and Isacsson, U.,** 2006. Rheological Effects of Commercial Waxes and Phosporic Acid in Bitumen 160/220–High and Medium Temperature Performance, *Construction and Building Materials*, 21 (10): 1899-1908.
- [96] **Iswandoro W.,** 2008. Mechanistic-Empirical Mixture Design for Hot Mix Asphalt Pavement Recycling, *Construction and Building Materials*, 22, 77-87.

- [97] **Kim, K.W. and El Hussein, M.,** 1997. Variation of Fracture Toughness of Asphalt Concrete under Low Temperatures, *Construction and Building Materials*, 11 (7–8): 403–11.
- [98] **Wu, S., Cong, P., Yu, J., Luo, X. and Mo, L.,** 2006. Experimental Investigation of Related Properties of Asphalt Binders Containing Various Flame Retardants, *Fuel*, 85 (9): 1298–304.
- [99] **Cong, P., Yu, J., Wu, S. and Luo, X.,** 2008. Laboratory Investigation of Properties of Asphalt and its Mixtures Modified with Flame Retardant, *Construction and Building Materials*, 22 (6): 1037–1042.
- [100] **Leitner, A.,** 2001. The Fire Catastrophe in the Tauern Tunnel: Experience and Conclusions for the Austrian Guidelines, *Tunnel Underground Space Technology*, 16 (3): 217–223.
- [101] **Modic, J.,** 2003. Fire Simulation in Road Tunnels, *Tunnel Underground Space Technol.*, 18 (5): 525–530.
- [102] **Cong, Y., Liao K., Huang, W. and Zhai, Y.,** 2006. Performance of SBR-Modified Asphalt, *Petroleum Science and Technology*, 24 (10): 1187-94.
- [103] **Hwang, C.C. and Edwards, J.C.,** 2005. The Critical Ventilation Velocity in Tunnel Fires – a Computer Simulation, *Fire Safety Journal*, 40 (3): 213–244.
- [104] **Van Den Berg, A.C. and Weerheijm, J.,** 2006. Blast Phenomena in Urban Tunnel Systems, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 19 (6): 598–603.
- [105] **Bari, S. and Naser, J.,** 2005. Simulation of Smoke from a Burning Vehicle and Pollution Levels Cause by Traffic Jam in a Road Tunnel, *Tunnel Underground Space Technol.*, 20 (3): 281–290.
- [106] **Yan, Z.G, Zhu, H.H. and Yang, Q.X.,** 2006. Large-Scaled Fire Testing for Long-Sized Road Tunnel, *Tunnel Underground Space Technol.*, 21 (3–4): 282.
- [107] **Peiliang, C., Jianying, Y., Shaopeng, W. and Xiaofeng, L.,** 2008. Laboratory Investigation of The Properties of Asphalt and its Mixtures Modified with Flame Retardant, *Construction and Building Materials*, 22, 1037-1042.
- [108] **Ghaly, N.F.,** 2008. Preparation and Evaluation of Special Hot Mix Asphalt for Steel Bridge Paving (Laboratory and Field Study), *World Journal of Chemistry*, 3 (1): 17-26.
- [109] **Ahmed, H.Y., Othman, A.M. and Mahmoud, A.A.,** 2006. Effect of Using Waste Cement Dust As A Mineral Filler On The Mechanical Properties of Hot Mix Asphalt, *The Assiut University Bulletin for Environmental Researches*, Vol. 9, No. 1.
- [110] **Schroeder, R.L.,** 1994. The Use of Recycled Materials in Highway Construction, *Public Roads*, 58 (2): 32-41.
- [111] **Ramaswamy, S.D. and Aziz, M.A.,** 1992. Some Waste Materials in Road Construction, Utilization of Waste Materials in Civil Engineering Construction, *Hilary Inyang and Kenneth Bergeson, ASCE*, NY, pp. 153-165.
- [112] **Ahmed, I.,** 1993. Use of Waste Materials in Highway Construction, *Noyes Data Corporation*, Park Ridge, USA.
- [113] **Katherine, H. and Eighmy, T.T.,** 2000. Scanning European Advances in the Use of Recycled Materials in Highway Construction, *Scanning Trip Summary Report*, USA.

- [114] **Bocci, M., Virgili, A., Grilli, A. and Pannunzio, V.,** 2007. Experimental Analysis of the Potentialities and Limits of Asphalt Mixtures by Adding Zeolite, *4th International SIIV Congress*, Palermo, Italy, 12-14.
- [115] **Yao, Z. and Monismith, C.L.,** 1987. Behavior of Asphalt Mixtures with Carbon Black Reinforcement, *Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 32.
- [116] **Button, J.W., Little, J.L., Kim, Y. and Ahmed, J.,** 1987. Mechanistic Evaluation of Selected Asphalt Additives, *Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 56, 62-90.
- [117] **Sonmez, 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.
- [118] **Little, D.N. and Epps, J.A.,** 2001. The Benefits of Hydrated Lime in Hot Mix Asphalt, *National Lime Association*.
- [119] **Al-Hourani, M.A.,** 1998. Effect of Polymer and Limestone Dust on the Durability of Asphalt Paving Mixtures, *MS Thesis*, Jordan University of Science and Technology.
- [120] **Mohammed, O.W.M.,** 1991. Effect of Types of Fillers On The Properties of Bituminous Mixtures In The Binder Layer, *MS Thesis*, Jordan University of Science and Technology.
- [121] **Chen, J.S. and Lin, K.Y.,** 2005. Mechanism and Behavior of Bitumen Strength Reinforcement Using Fibers, *Journal of Materials Science*, 40, 87-95.
- [122] American Concrete Institute (ACI), 1986. in Committee 544 Report, ACI 544.1R-82, State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Concrete, Detroit, p.124.
- [123] **Uomoto, T., Mutsuyoshi, H., Katsuki, F. and Sudhir, M.,** 2002. Use of Fiber Reinforced Polymer Composites as Reinforcing Material for Concrete, *Journal of Materials and Civil Engineering*, 14 (3): 191-209.
- [124] **Stuart, K.D.,** 1992. Stone Mastic Asphalt (SMA) Mixture Design, U.S. Department of Transportation, in FHWA-RD-92-006, Washington, DC, p. 156.
- [125] **Peltonen, P.V.,** 1991. Characterization and testing of fibre-modified bitumen composites, *Journal of Material Science*, 26(209): 5618-5622.
- [126] **Akbulut, H., Woodside, A.R. and Woodward, W.D.,** 2000. Polymer Modified Cellulose Pellet Fiber in Bituminous Mixtures, in *Proceedings of 2nd Eurasphalt&Eurobitume Congress*, on CD-ROM, Barcelona.
- [127] **Cooley, L.A., Brown, E.R. and Watson, D.E.,** 2000. in NCAT 2000-05, Evaluation of OGFC Mixtures Containing Cellulose Fibers, *National Center for Asphalt Technology*, Alabama, p. 87.
- [128] **Brown, E.R., Mallick, R.B., Haddock J.W. and Bukowski, J.,** 1997. Performance of Stone Matrix Asphalt (SMA) Mixtures in the United States, *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, Vol. 66.
- [129] **Decoene, Y.,** 1990. Contribution of Cellulose Fibers to the Performance of Porous Asphalts, *Transport Research Record*, 1265, 82-86.
- [130] **Daines, M.E.,** 1992. Trials of Porous Asphalt and Rolled Asphalt on the A38 at Butron, *Department of Transport TRRL*, Report RR 323, Crowthorne, U.K., p.125.

- [131] **Nicholls, J.C.**, 1997. Review of UK Porous Asphalt Trials, *Transport Research Laboratory TRL, Report 264*, Crowthorne, U.K., p. 165.
- [132] **Tarefder, R.A., Zaman, M. and Hobson, K.**, 2003. Micro-Deval Test for Evaluating Properties of Roadway Aggregate, *International Journal of Pavements*, Maintenance and rehabilitation of pavements and technological control, Vol. 2, Issue 1-2.
- [133] **Schoenberger, J.E., Hardy, D.L. and Pekar, J.W.**, 1999. Use of diesel-contaminated soil in recycled cold-mix pavement, *ASCE, Practice Periodical of Hazardous Toxic Radioact Waste Manage*, Vol. 3, pp. 118-123.
- [134] **Borhan, M.N., Suja, F. and Ismail, A.**, 2009. The Effects of Used Cylinder Oil on Asphalt Mixes, *European Journal of Scientific Research*, ISSN 1450-216X, 28(3): 398-411.
- [135] **Suliman M. and Awwad M.**, 2000. The use of oil shale aggregates as a pavement material, Internal Rep., Amman College for Engineering Technology and Al-Balqa Applied Univ., *Jordan Engineers Association.*, Amman, Jordan.
- [136] **Asi, I., and Assa'ad, A.**, 2005. Effect of Jordanian oil shale fly ash on asphalt mixes, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 17 (5): 553-559.
- [137] **Villanueva, A., Susanna, H. and Zanzotto, L.**, 2008. Asphalt modification with used lubricating oil, *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 35, pp. 148-157.
- [138] **Kuloğlu, N. and KÖK, B.V.**, 2004. Using Steel Reinforcement in Asphalt Concrete, *F.Ü. Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 16 (2): 233-242.
- [139] **Potter, J.F. and Mercer, J.**, 1997. Full-scale Performance Trials and Accelerated Testing of Hot-Mix Recycling in the U.K., *8th International Conference on Asphalt Pavements*, Seattle, U.S.A.
- [140] **Servas, V.P., Ferreira, M.A. and Curtayne, P.C.**, 1987. Fundamental Properties of Recycled Asphalt Mixes. *Proceedings of the Sixth International Conference on Structural Design of Asphalt Pavements*. Vol. 1, pp. 455-465, Ann Arbor. Michigan, U.S.A.
- [141] **Li, A., Sih, G.C. and Nied, H.F.**, 2007. Research on Pavement Performance of Packaging Waste Polymer Composite Modified Asphalt, *Proceedings of International Conference on Health Monitoring of Structure, Materials and Environment*, Vol. 1 and 2, pp. 1184-1188.
- [142] **Prowell, B.D.**, 2001. Design, Construction and Early Performance of Virginia's Hot-Mix Asphalt Stabilizer and Modifier Test Sections, Asphalt Mixtures, 2001. *Materials and Construction, Transportation Research Record*, Issue 1767, pp. 7-14.
- [143] **Tapkin, S., Usar, U., Tuncay, A. and Tuncan, M.**, 2009. Repeated Creep Behavior of Polypropylene Fiber-Reinforced Bituminous Mixtures, *Journal of Transportation Engineering, ASCE*, 135 (4): 240-249.
- [144] **Qui, X. and Ling, J.M.**, 2007. Laboratory Evaluation of Mechanical Performance on Surfacing Asphalt Mixtures in Hong Kong, *Proceedings of International Conference on Health Monitoring of Structure, Materials and Environment*, Vol. 1 and 2, pp. 583-589.
- [145] **Apeagyei, A.K., Buttlar, W.G. and Dempsey, B.J.**, 2008. Investigation of Cracking Behaviour of Antioxidant-Modified Asphalt Mixtures, *Journal of The Association of Asphalt Paving Technologists*, Vol. 77, pp. 517-547.

- [146] **Li, N., Wu, S.P. and Liu, C.H.**, 2008. Investigation of Static and Dynamic Response of Graphite and Carbon Fiber Modified Conductive Asphalt-Based Composite, *Advanced in Fracture and Damage Mechanics VII*, Vol. 385-387, pp. 469-472.
- [147] **Goh, S.W. and You, Z.P.**, 2008. A Preliminary Study of the Mechanical Properties of Asphalt Mixture Containing Bottom Ash, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 35 (10): 1114-1119.
- [148] **Hejazi, S.M., Abtahi, S.M., Sheikhzadeh, M. and Semnani, D.**, 2008. Introducing Two Simple Models for Predicting Fiber-Reinforced Asphalt Concrete Behavior During Longitudinal Loads, *Journal of Applied Polymer Science*, 109 (5): 2872-2881.
- [149] **Ziari, H. and Khabiri, M.M.**, 2007. Preventive Maintenance of Flexible Pavement and Mechanical Properties of Steel Slag Asphalt, *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, 15 (3): 188B-192B.
- [150] **Tapkin, S.**, 2008. Mechanical Evaluation of Asphalt-Aggregate Mixtures Prepared with Fly Ash as a Filler Replacement, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 35 (1): 27-40.
- [151] **El-Dolil, S.A., Wong, W.C. and Steele, R.**, 1989. Teletraffic Performance of Highway Microcells with Overlay Macrocell, *IEEE. J. Select. Areas Commun.*, Vol. 7, pp. 71-78.
- [152] **Guerin**, 1987. Channel Occupancy Time Distribution in a Cellular Radio System, *Vehicular Technology*, IEEE Transactions on, 36 (3): 89-99.
- [153] **Hong, D.H. and Rappaport, S.S.**, 1986. Traffic Model and Performance Analysis for Cellular Mobile Radio Telephone System with Prioritized and Nonprioritized Handoff Procedures, *IEEE. Trans. Veh. Technol.*, Vol. VT-35, pp. 77-92.
- [154] **Foschini, G.J., Gopinath, B. and Miljanic, Z.**, 1993. Channel Cost of Mobility, *IEEE. Trans. Veh. Technol.*, Vol. 42, pp. 414-424.
- [155] **Meier-Hellstern, K.S. and Alonso, E.**, 1992. The Use of SS7 and GSM to Support High Density Personal Communications, in *Proc. IEEE. International Conference in Communications*, Chicago, IL, pp. 1698-1702.
- [156] **Cho, H.**, 1994. Analysis of Signaling Traffic Related to Location Registrations/Updatings in Personal Communication Networks, M.S. Dissertation, *Korea Adv. Inst. Sci. Technol., Dept. Elect. Eng.*,
- [157] **Kim, T.S. and Sung, D.K.**, 1994. The Effects of Handoffs on The Microcellbased PCN Networks, in *Proc. IEEE Conf. Global Telecommun.*, San Francisco, CA, pp. 1316-1320.
- [158] **Kim, T.S., Chung, M.Y. and Sung, D.K.**, 1998. Mobility and Traffic Analyzes in Three-Dimensional PCS Environments, *IEEE Transaction on Vehicular Technology*, 47 (2): 537-545.
- [159] **Kim, T.S., Chung, M.Y. and Sung, D.K.**, 1998. Mobility Modeling and Traffic Analysis in Three-dimensional indoor Environments, *IEEE Transaction on Vehicular Technology*, 47 (2): 546-557.
- [160] **Kim, T.S., Kwon, J.K. and Sung, D.K.**, 2000. Mobility Modeling and Traffic Analysis in Three-Dimensional High-Rise Building Environments, *IEEE Transaction on Vehicular Technology*, 49 (5): 1633-1640.
- [161] **Umar, F. ve Yayla, N.**, 1981. Yol İnşaati, *İstanbul Teknik Üniversitesi Matbaası*, İstanbul, 205 s.
- [162] **Yayla, N.**, 2004. Karayolları Mühendisliği, *Birsen Yayınevi*, İstanbul.
- [163] **Yıldırım, B.**, 1984. Yol İnşaati, *Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Yayını*, Elazığ, 181 s.

- [164] **Keçeciler, A.F. ve Akkol, G.**, 1988. Bitümlü Malzemeler Laboratuvar El Kitabı, T.C. Bayındırlık Bakanlığı, Karayolları Genel Müdürlüğü, Araştırma Dairesi Başkanlığı, Ankara, 156 s.
- [165] **Umar, F. ve Ağar, E.**, 1991, Yol Üstyapısı, *İstanbul Teknik Üniversitesi Matbaası*, İstanbul, 339 s.
- [166] Karayolu Teknik Şartnamesi, 2006, *Karayolları Genel Müdürlüğü Yayınları*, Ankara, 753 s.
- [167] **Kennedy, T.W., Turnham, N., Epps, J.A., Smoot, C.W., Young, F.M., Button, J.W. and Zeigler, C.D.**, 1983. Evaluation of Methods for Field Applications of Lime to Asphalt Concrete Mixtures. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, Vol. 52, pp.508–534.
- [168] **Karavaşin, M.**, Aşırı Dingil Yüklemesinin Karayollarına Verdiği Zararlar, T.C. Ulaştırma Bakanlığı. <http://ubak.gov.tr/tr/kugm/dosyalar/diger/dosya65.ppt>, 28 Aralık 2007.
- [169] **Sönmez, İ.**, 1998. Asfalt Serme ve Sıkıştırma Teknikleri, *Yapı Malzeme ve Teknik Dergisi*, 94, 94-102.
- [170] **İlcalı, M., Tayfur, S. ve Özen, H.**, 2001. Asfalt ve Uygulamaları, ISFALT, İstanbul, 280 s.
- [171] www.asnud.org.tr/asfalt.php?sayfa=25, ASMÜD, Türkiye Asfalt Müteahhitleri Derneği. 2012.
- [172] **İlcalı, M.**, 2001. Asfalt Kaplamalar, *İstanbul Asfalt Sanayi ve Ticaret A.Ş. Yayınları*, Yayın No. 1, İstanbul.
- [173] **Önal, M. A., Kahramangil M.**, 1993. Bitümlü Karışımlar Laboratuvar El Kitabı, *Karayolları Genel Müdürlüğü Matbaası*, Ankara, 200 s.
- [174] **Önal, M.A. ve Karaca, S.**, 1990. Asfalt Betonu ve Diğer Sıcak Karışım Tipleri için Karışım Dizayn Metotları, *Karayolları Genel Müdürlüğü Matbaası*, Ankara, 107 s.
- [175] **Tunç, A.**, 2004. Esnek Kaplama Malzemeleri El Kitabı, *Asil Yayın Dağıtım Ltd.Şti.*, Ankara, 352 s.
- [176] **Tunç, A.**, 2001. Yol Malzemeleri ve Uygulamaları, *Atlas Yayınevi*, Yayın no. 01, İstanbul.
- [177] Principle of Construction of Hot-Mix Asphalt Pavement, 1983. *Asphalt Institute*, Kentucy, (MS-22), 289 p.
- [178] Asphalt In Pavement Maintenance, 1999. *Asphalt Institute*, Kentucy, Series Manual No.16, M-3, 80p.
- [179] Superpave Mix Design, 1996. Lexington, KY: *Asphalt Institute*, Superpave Series, No. 2, (SP-2), 117p.
- [180] **Öztürk, E.A. ve Çubuk, M.K.**, 2004. Karayolları Esnek Üst Yapı Tasarımında Yeni Bir Yöntem, Yüksek Performanslı Asfalt Kaplama, Gazi Üniversitesi, *Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, Ankara, 19 (2): 175-184.
- [181] **Orhan, F.**, 2001. Asfaltın Geleceği Superpave, K.G.M., Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı, p. 379-393.
- [182] Superpave for The Generalist Engineer and Project Staff, 1997. US. Department of Transportation Federal Highway Administration, *National Highway Institute*, Publication No. FHWA HI 97-031, USA.
- [183] **Dinç, E. Ve Yazıcı, A.**, 2000. Superpave Bitüm Deneyleri ve Agrega Gradasyonu, *3.Asfalt Sempozyumu*, Ankara, s. 161-172.
- [184] **Noureldin, A.S.**, 1995. Long Term Performance Of Asphalt Cement Binders, A Dual View, Physical Properties Of Asphalt Cement Binders, ASTM STP 1241, *John C. Hardin, Ed., American Society For Testing And Materials*, Philadelphia.

- [185] **Traxler, R.N.**, 1963. Durability Of Asphalt Cements, *Proceedings, Association Of Asphalt Paving Technologists*, Vol. 32, pp. 44-63.
- [186] **Whiteoak, D.**, 2004. Shell Bitüm El Kitabı, İSFALT, Bilimsel Yayın no. 3, İstanbul.
- [187] **TS 706**, 1980. Beton Agregaları, TSE, Ankara, 1-2 s.
- [188] **Kandhal, P., Parker, F. and Mallick, R.**, 1997. Aggregate Tests for Hot Mix Asphalt: State of Practice, NCAT Report No. 97-06, Alabama, U.S.A., pp. 10-15.
- [189] **The Asphalt Institute**, 1996. Superpave Mix Design, Superpave Series No. 2 (SP-2), U.S.A., 100 p.
- [190] **Balta, İ.**, 2004. Bitümlü Sıcak Karışımların Sudan Kaynaklanan Bozulmalara Karşı Duyarlılığı, *Yüksek Lisans Tezi*, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 224 s.
- [191] **Uluçaylı, M. ve Yavuz, A.**, 1989. Asfalt El Kitabı, *Asfalt Enstitüsü El Kitabı*, Serisi No. 4, İSFALT, s. 35-36.
- [192] **Sağlık, A. ve Güngör, A.G.**, 2008. Esnek Üstyapı Projelendirme Rehberi, Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı, Üstyapı Şube Müdürlüğü, Ankara.
- [193] **Tunç, A.**, 2004. Kaplama Mühendisliği ve Uygulamaları, *Asil Yayınevi*, 1.Baskı, Ankara.
- [194] **Taşdemir, Y.**, 2003. Bitümlü Kaplamaların Termal Davranışlarının Performans Testleriyle İncelenmesi, *Doktora Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [195] **Vinson, T.S., Hicks, R.G. and Janoo, V.C.**, 1998. Low Temperature Cracking and Rutting in Asphalt Concrete Pavements, in Roads and Airfields in Cold Regions, *American Society of Civil Engineers*, New York, pp. 20-348.
- [196] **McGennis, R.B., Anderson, R.M., Kennedy, T.W. and Solaimanian, M.**, 1995. Background of Superpave Asphalt Mixture Design and Analysis, *U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration*, Publication No. FHWA-SA-95-003, 172 p.
- [197] **İskender, E.**, 2004. Asfalt Betonunda Kalıcı Deformasyon Probleminin Değerlendirilmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- [198] **Huber, G.A. and Heiman, G.H.**, 1987. Rutting of Asphalt Pavements in Saskatchewan, *Journal of Canadian Technical Asphalt Association*, 32, 152-176.
- [199] **Gürer, C.**, 2003. Asfalt Kaplamalarda Meydana Gelen Kusurlar ve Rehabilitasyon Yöntemleri, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yapı Eğitim A.B.D., Afyon Kocatepe Üniversitesi.
- [200] **Burt, A.R.**, 1984. M4 Motorway, a Composite Pavement Surface Cracking, *Highway and Transportation*, Vol. 34, pp. 16-19.
- [201] **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.
- [202] www.remyapisal.com, Asfalt Kaplamalar. Ocak 2014.
- [203] **Roberts, F.L., Mohammad, L.N. and Wang, L.B.**, 2002. History of Hot Mix Asphalt Mixture Design in the United States, American Society of Civil Engineers, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 14 (4): 279-293.
- [204] **Clarkson, O.H. and Hics, G.R.**, 1982. Hihgway Engineering, New York, 730 p.

- [205] **Ahmedzade, P., Kuloğlu, N., Ahmedzade M., Karakaş, A.S., Kuloğlu, M. ve Yılmaz, M.,** 2007. Saf ve Modifiyeli Bitümlerin Klasik ve Superpave Yöntemleriyle Reolojik Yapılarının İncelenmesi, D.P.T., Proje No. 2003K120440.
- [206] **Whiteoak, D. and Read, J.,** 2003. The Shell Bitumen Handbook, Thomas Telford Lti., London, 464 p.
- [207] **Denning, J.H. and Carswell, J.,** 1981. Improvements in rolled asphalt surfacings by the addition of organic polymers, Department of Environment, Department of Transport TRRL Report LR 989, Transport and Road Research Laboratory, crowthorne.
- [208] **Superpave Mixture Design Guide,** 2001. Westractal Forensic Team Consensus Report, Washington, DC.
- [209] www.istatistikmerkezi.com/makale,istatistik-korelasyon-analizi,147.html, 15 Nisan 2011.
- [210] **Doğan, M.,** 2006. Effect of Polymer Additives on The Physical Properties of Bitumen Based Composites, A Thesis Submitted to The Graduate School of Natural and Applied Sciences of Middle East Technical University, Ankara
- [211] **Yıldırım, Z.,** 2006. Polimer Modifiye Bitümlü Malzeme Üretiminde Atık Plastiklerin Kullanımı, *Yüksek Lisans Tezi*, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir
- [212] **TS 118 EN 1426,** 2002. Bitümler ve Bitümlü Bağlayıcılar – İğne Batma Derinliği Tayini, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [213] **Çolak, H.,** 2011. Atık Lastik Kauçukla Modifiye Edilmiş Bitüm ve Sıcak Asfalt Karışımların Değerlendirilmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, p.80.
- [214] **Lavin, P.G.,** 2003. Asphalt Pavements, *Spon Pres*, London and New York, 444 p.
- [215] **Demirel, Z., Kadioğlu, M.,** 1993. Toprak ve Stabilizasyon Laboratuvarı El Kitabı, Karayolları Genel Müdürlüğü, Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı, Ankara, 180 s.
- [216] **Kennedy, T.W., Huber, G.A., Harrigan, E.T., Cominsky R.J., Hughes, C.S., Quintus H.V. and Moulthrop, J.S.** 1994. Superior Performing Asphalt Pavements (Superpave), The Product of the SHRP Asphalt Research Program, SHRP-A-410, *National Research Council*, Washington, DC, 170 p.
- [217] **Harman, T., D'Angelo, J. and Bukowski, J.,** 2002. Superpave Asphalt Mixture Design Workshop, U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration, Washington, 78 p.
- [218] **Cominsky, R.J., Huber, G.A., Kennedy, T.W. and Anderson, M.,** 1994. The Superpave Mix Design Manuel for New Construction and Overlays, SHRP-A-407, *National Research Council*, Washington, DC., 184 p.
- [219] **Çolak, K.Ç.,** 2006. Asfalt Kaplamalarda Sinerjetik Fayda Konusunun Anlaşılmasında Marshall Oranı Yaklaşımının Kullanılması, *Yüksek Lisans Tezi*, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- [220] **TS EN 12697-44,** 2010. Bitümlü Karışımlar - Sıcak Asfalt Karışımları İçin Deney Yöntemleri, Bölüm 44, Yarım Daire Eğilme Deneyi ile Çatlak İlerlemesi, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [221] **Karakaş, A.S.,** 2006. Darbeli Sıkıştırmanın Asfalt Betonu Kaplamaların Fiziksel Özelliklerine Etkisi, *Yüksek Lisans Tezi*, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.

- [222] **Bayazıt, M. ve Oğuz, B.Y.**, 2005. Mühendisler için İstatistik, İTÜ İnşaat Fakültesi, *Birsen Yayınevi*, İstanbul.
- [223] **Yılmaz, M. and 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.
- [224] **Hınısloğlu, S.**, 1998. An Investigation on the Marshall and Resilient Characteristics of Asphalt Concrete with Bituminous Binder Modified with High Density Polyethylene, *Doktora Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [225] **Yılmaz, M.**, 2011. Asfaltitin Bitümlü Sıcak Karışımların Mekanik Özellikleri Üzerindeki Etkisinin Araştırılması, *Doktora Tezi*, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 309 s.
- [226] **Kök, B.V.**, 2007. Bitümlü Sıcak Karışımların Üretiminde Yeni bir Karıştırma Yönteminin Araştırılması, *Doktora Tezi*, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [227] **Harvey, J.T., Deacon, J.A., Tsai, B. and Monismith, C.L.**, 1995. Fatigue Performance of Asphalt Concrete Mixes and its Relationship to Asphalt Concrete Pavement Performance in California, California Department of Transportation, Report no: RTA-65W485-2.
- [228] **Simms, S.A.**, 1998. Use of Coal Fly Ash in Asphalt Concrete Mixes, *MSc Thesis*, Dalhousie University, Daltech, Canada.
- [229] **Francken, L.**, 1998. Bituminous Binders and Mixes, Rilem Reports, E & FN Spon, London and New York, 352 p.
- [230] **Subagio, B.S., Siswosoebrotho, B.I. and Karsaman, R.H.**, 2003. Development of Laboratory Performance of Indonesian Rock Asphalt (Asbuton) in Hot Rolled Asphalt Mix, *Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 4, 436-449.
- [231] **Aragao F.T.S., Lee, J., Kim, Y.R. and Karki, P.**, 2010. Material Specific Effects of Hydrated Lime on the Properties and Performance Behaviour of Asphalt Mixtures and Asphaltic Pavements, *Construction and Building Materials*, 24 (4): 538-544.
- [232] **Ghile, D.B.**, 2006. Effects of Nanoclay Modification on Rheology of Bitumen and on Performance of Asphalt Mixtures, *MSc Thesis*, Delfth University of Technology, Delfth, Holland.
- [233] **Alavi, H.A., Ameri, M., Gandomi, A.H. and Mirzahosseini, M.R.**, 2011. Formulation of Flow Number of Asphalt Mixes Using a Hybrid Computational Method, *Construction and Building Materials*, 25 (3): 1338-1355.
- [234] **Khodaii, A. and Mehrara, A.**, 2009. Evaluation of Permanent Deformation of Unmodified and SBS Modified Asphalt Mixtures Using Dynamic Creep Test, *Construction and Building Materials*, 23 (7): 2586-2592.
- [235] **Geçkil, T.**, 2008. Siyah Karbonun Bitümlü Sıcak Karışımların Özelliklerine Etkisinin Araştırılması, *Doktora Tezi*, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 309 s.
- [236] **Witczak, M.W., Kaloush, K.E., Pellinen, T., El-Basyouny, M. and Von Quintus, V.**, 2002. Simple Performance Test for Superpave Mix Design, The National Cooperative Highway Research Program, NCHRP Report 465, Washington, DC.
- [237] **Kaloush, K.E. and Witczak, M.W.**, 2002. Tertiary Flow Characteristics of Asphalt Mixtures, *J. Assoc. Asphalt Paving Technol.*, 71, 278-306.

- [238] **ELE**, 1994. Universal Materials Testing Apparatus for Asphalt and Unbound Specimens, Reference and Operating Manual, *ELE International Ltd.*, Hertfordshire, UK.
- [239] **Troxler 4640-B**, Nükleer Metotla İnce Tabaka, Asfalt Yoğunluk Ölçme Aleti Kullanım Kılavuzu, *Mate Eğitim Yayınları Serisi*, No. 58.
- [240] **TS 10465**, 1992. Beton Deney Metotları Yapı ve Yapı Bileşenlerinde Sertleşmiş Betondan Numune Alınması ve Basınç Mukavemetinin Tayini, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [241] **Ercan, A.**, 2003. Yapı İnceleme Yöntemleri, *Mühendislik Jeolojisi Dizisi II*, Birsan Yayınevi, Ankara.
- [242] **Partl, M.**, 1993. Investigation of Bituminous Highway Pavements Subjected to Heavy Traffic Loading, *5th Eurobitume Congress*, 16p.
- [243] **Archilla, A.R.**, 2000. Development of A Pavement Rutting Model from Experimental Data, *Journal of Transportation Engineering*, pp. 291-293.
- [244] **İskender, E.**, 2008. Koşullandırma Sistemlerinin Geleneksel ve Modifiye Asfalt Karışımlar Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması, KTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği A.B.D., *Doktora tezi*, Trabzon, p.128.
- [245] **Aschenbrener, T., Terrel, R.L. and Zamora, R.**, 1994. Comparison of the Hamburg Wheel-Tracking Device and the Environmental Conditioning System to Pavements of Known Stripping Performance, CDOT-DTD-R-94-1, Colorado Department of Transportation, Denver, CO.
- [246] www.sehirrehberi.ibb.gov.tr/map.aspx, Uydu Fotoğrafı. Ocak 2014.
- [247] www.google.com/earth/index.html, Uydu Fotoğrafı. Ocak 2014.
- [248] **TS 1081 EN 12591**, 2003. Bitümler ve Bitümlü Bağlayıcılar–Kaplama Sınıfı Bitümler–Özellikler, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [249] **TS 119**, 1964. Bitümlü Maddelerin Duktilité Deneyi için Metot, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [250] **Ullidtz, P.**, 1987. Pavement Analysis, Developments in Civil Engineering, Vol. 19, *Elsevier*, Amsterdam, p. 318.
- [251] **Akçil, M.**, Ders notu. http://baskent.edu.tr/~matemel/courses/veri_analizi_regresyon_analizi.ppt, 2011.

ÖZGEÇMİŞ

Ahmet Sertaç KARAKAŞ, 1976 yılında Ankara’da doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini Diyarbakır’da tamamladı.

1994 yılında Dicle Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü’nde lisans eğitimine başlayıp, 1998 yılında mezun oldu. Aynı yıl İstanbul Esenyurt Belediyesi İmar ve Planlama Dairesi’nde İnşaat Mühendisi olarak çalışmaya başladı. 2000 yılında Dicle Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü Geoteknik Anabilim Dalı’nda Uzman olarak çalışmaya başladı. 2002 yılında Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda yüksek lisans eğitimine başladı, 2004 yılında yüksek mühendis olarak mezun oldu. 2004 yılında aynı anabilim dalında doktora eğitimine başladı. 2006 yılında doktora eğitimine ara vererek, askerlik hizmetini kısa dönem er olarak, İzmir Poligon Deniz Er Eğitim Tabur Komutanlığı ve İskenderun Deniz Bakım Onarım İstihkam Komutanlığı’nda tamamladı. 2008 yılında kurum değişikliği ile İstanbul Üniversitesi Yapı İşleri ve Teknik Daire Başkanlığı’nda İnşaat Yüksek Mühendisi olarak çalışmaya başladı.

Evli ve bir çocuk babası olan KARAKAŞ, 2008 yılından beri İstanbul Üniversitesi, Yapı İşleri ve Teknik Daire Başkanlığı’nda İnşaat Yüksek Mühendisi olarak görev yapmaktadır.

