

**T.C.
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ATIK LASTİKLERDEN ELDE EDİLEN SİYAH KARBONUN BİTÜM VE
BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIMLARA ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Zülfükar AKSAĞAN

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Tacettin GEÇKİL

OCAK 2021

**T.C.
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ATIK LASTİKLERDEN ELDE EDİLEN SİYAH KARBONUN BİTÜM VE
BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIMLARA ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Zülfükar AKSAĞAN

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Tacettin GEÇKİL

OCAK 2021

TEŞEKKÜR

Çalıőmalarım boyunca değerli yardım ve gürüőlerini benden esirgemeyen danışman hocam Doç. Dr. Tacettin GEÇKİL'e, yapmıő olduğum laboratuvar çalışmalarında yardımlarını esirgemeyen Yüksek İnşaat Mühendisi Oğuz SALMAN'a, Öğretim Görevlisi Aykut Fatih KORAL'a ve Yüksek İnşaat Mühendisi Ceren Beyza İNCE'ye katkıları ve yardımlarından dolayı teşekkür ederim.

Özellikle bu süreçte her koşulda yanımda olan ve yoğun iç temposundan dolayı ihmal ettiğim eőim ve kızıma, eğitimim için her zaman destek olan anneme ve babama sonsuz sevgi ve teőekkürlerimi sunarım.



ONUR SÖZÜ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum ATIK LASTİKLERDEN ELDE EDİLEN SİYAH KARBONUN BİTÜM VE BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIMLARA ETKİSİ başlıklı bu çalışmanın bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurmaksızın tarafımdan özenle yazıldığını ve yararlandığım kaynakların, kaynakçada yöntemine uygun biçimde gösterilenlerden oluştuğunu belirtir, bunu onurumla doğrularım.

Zülfükar AKSAĞAN



İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	i
ONUR SÖZÜ	ii
İÇİNDEKİLER	iii
ÇİZELGELER DİZİNİ	v
ŞEKİLLER DİZİNİ	vi
SEMBOLLER ve KISALTMALAR	viii
ÖZET	x
ABSTRACT	xi
1. GİRİŞ	1
2. BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIMLAR	3
2.1 Bitümlü Sıcak Karışımlarda Kullanılan Agregalar	3
2.1.1 Agregaların özellikleri	3
2.1.1.1 Mineralojik yapı	3
2.1.1.2 Boyut	4
2.1.1.3 Gradasyon	4
2.1.1.4 Porozite	5
2.1.1.5 Yüzey alanı ve boşluk oranı	5
2.1.1.6 Yüzey yapısı ve biçim	5
2.1.2 Agregalara uygulanan deneyler	5
2.1.2.1 Elek analizi deneyi	6
2.1.2.2 Aşınma deneyi	6
2.1.2.3 Özgül ağırlık deneyi	7
2.1.2.4 Hava tesirlerine karşı dayanıklılık deneyi	7
2.1.2.5 Cilalanma deneyi	7
2.1.2.6 Soyulma mukavemeti deneyi	8
2.1.2.7 Yassılık ve incelik-uzunluk tayini	8
2.2 Bitümlü Sıcak Karışımlarda Kullanılan Bağlayıcılar	8
2.2.1 Asfalt bağlayıcılara uygulanan geleneksel deneyler	10
2.2.1.1 Penetrasyon deneyi	11
2.2.1.2 Yumuşama noktası deneyi	12
2.2.1.3 Düktilite deneyi	12
2.2.1.4 Parlama noktası deneyi	13
2.2.1.5 Özgül ağırlık deneyi	14
2.2.2 Asfalt bağlayıcılara uygulanan Superpave deneyleri	14
2.2.2.1 Dönel ince film halinde ısıtma kaybı deneyi	18
2.2.2.2 Basınçlı yaşlandırma kabı deneyi	18
2.2.2.3 Dinamik Kesme Reometresi	19
2.2.2.4 Kiriş Eğme Reometresi	21
2.2.2.5 Dönel Viskozimetre Deneyi	23
2.3 Bitümlü Sıcak Karışımlardan Beklenen Özellikler	24
2.3.1 Stabilite	25
2.3.2 Durabilite	25
2.3.3 Geçirimsizlik	25
2.3.4 İşlenebilirlik	25
2.3.5 Esneklik	26
2.3.6 Yorulmaya karşı direnç	26

2.3.7	Kaymaya karşı direnç	26
2.4	Bitümlü Sıcak Karışımlarda Meydana Gelen Bozulmalar	26
2.4.1	Tekerlek izi oluşumu	26
2.4.2	Yorulma çatlakları	27
2.4.3	Düşük sıcaklık çatlakları.....	27
2.4.4	Kusma	28
2.5	Bitümlü Sıcak Karışımlarda Kullanılan Dizayn Yöntemleri	28
2.5.1	Marshall dizayn yöntemi	29
2.5.2	Superpave dizayn yöntemi.....	29
2.6	Bitümlü Sıcak Karışımlara Uygulanan Deneyler.....	30
2.6.1	Marshall stabilite ve akma deneyi	30
2.6.2	Kalıcı marshall stabilitesi (RMS) deneyi.....	31
2.6.3	Dolaylı çekme mukavemeti (ITS) deneyi.....	32
2.6.4	Modifiye Lottman (Nem Hasarı) deneyi	33
2.6.5	Dolaylı çekme esneklik modülü deneyi.....	34
2.6.6	Sünme deneyi.....	35
3.	ATIK SİYAH KARBON İLE BİTÜM MODİFİKASYONU	37
3.1	Piroliz yöntemi ile siyah karbon (SK) üretimi	39
3.2	Literatür çalışmaları	40
4.	MALZEME VE DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	44
4.1	Bitümlü bağlayıcı seçilmesi	44
4.2	Agrega seçilmesi	45
4.3	Katkı malzemesinin seçilmesi.....	46
4.4	Modifiye bitümlerin hazırlanması	47
4.5	Modifiye bitümlerin fiziksel özelliklerinin belirlenmesi	48
4.6	Bağlayıcıların yaşlandırılması.....	52
4.7	Bağlayıcıların Performans Deneyleri	56
4.7.1	Dönel viskozimetre (RV) deneyi	56
4.7.2	Dinamik kesme reometresi (DSR) deneyi	59
4.7.3	Kiriş eğme reometresi (BBR) deneyi.....	68
4.8	Bitümlü Sıcak Karışımların Hazırlanması	71
4.8.1	Marshall numunelerinin hazırlanması	71
4.8.2	Optimum bitüm yüzdesinin bulunması.....	73
4.9	Karışımlar Üzerinde Uygulanan Performans Deneyleri	80
4.9.1	Marshall stabilite ve akma deney sonuçları.....	80
4.9.2	Kalıcı marshall stabilitesi (RMS) deney sonuçları	83
4.9.3	Dolaylı çekme mukavemeti (ITS) deney sonuçları	85
4.9.4	ITSM deney sonuçları.....	89
4.9.5	Sünme deney sonuçları	90
5.	SONUÇ	96
6.	KAYNAKLAR	98
7.	ÖZGEÇMİŞ	102

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1 : Geleneksel Asfalt Bağlayıcı Deney Yöntemleri	11
Çizelge 2.2 : Superpave deneyleri ve amaçları	15
Çizelge 2.3 : Superpave Performans Esaslı Asfalt Bağlayıcı Şartnamesi.....	16
Çizelge 3.1 : Modifiyer Maddeleri	38
Çizelge 4.1 : B 160/220 penetrasyon sınıflı saf bitümün fiziksel özellikleri.	45
Çizelge 4.2 : Agreganın fiziksel özellikleri.....	45
Çizelge 4.3 : Agregada gradasyonu.	46
Çizelge 4.4 : SK'nın özellikleri.....	46
Çizelge 4.5 : SK'nın element analizi.....	47
Çizelge 4.6 : Bağlayıcıların geleneksel test sonuçları.....	48
Çizelge 4.7 : Bağlayıcıların PI değerleri.....	51
Çizelge 4.8 : Bağlayıcıların kütle kayıpları.....	52
Çizelge 4.9 : RTFOT sonrası geleneksel test sonuçları.....	53
Çizelge 4.10 : RTFOT sonrası bağlayıcıların PI değerleri.....	55
Çizelge 4.11 : Bağlayıcıların RV Sonuçları.....	57
Çizelge 4.12 : Bağlayıcıların karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları.....	58
Çizelge 4.13 : Orijinal bağlayıcıların DSR sonuçları.....	60
Çizelge 4.14 : RTFOT ile yaşlandırılmış bağlayıcıların DSR sonuçları.....	63
Çizelge 4.15 : PAV ile yaşlandırılmış bağlayıcıların DSR sonuçları.....	66
Çizelge 4.16 : Bağlayıcıların BBR deney sonuçları.....	69
Çizelge 4.17 : B 160/220 saf karışımın optimum bitüm belirlenmesine ait deney sonuçları.....	76
Çizelge 4.18 : Optimum bitüm içeriğinde kullanılan değerler.....	79
Çizelge 4.19 : Kontrol numunesine ait sonuçlar.....	79
Çizelge 4.20 : Performans deneylerinde kullanılan numune sayıları.....	80
Çizelge 4.21 : SK katkılı karışım numunelerinin Marshall stabilite ve akma değerleri.....	81
Çizelge 4.22 : RMS deney sonuçları.....	84
Çizelge 4.23 : Saf ve SK katkılı karışımların ITS ve ITSR değerleri.....	87
Çizelge 4.24 : Karışımların ITSM deney sonuçları.....	89
Çizelge 4.25 : Karışım numunelerinin Rm değerleri.....	94

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 : Agrega Gradasyon Tipleri.....	4
Şekil 2.2 : Elek Analizi Deney Düzeneği.....	6
Şekil 2.3 : Ham petrolün damıtılmasıyla elde edilen asfaltlar	9
Şekil 2.4 : Bitümün farklı sıcaklık ve zamana göre değişimi.....	10
Şekil 2.5 : Asfaltın sıcaklıkla değişimi.....	10
Şekil 2.6 : Penetrasyon Cihazı.....	11
Şekil 2.7 : Yumuşama Noktası Cihazı.....	12
Şekil 2.8 : Düktülite Cihazı.....	13
Şekil 2.9 : Parlama Noktası Cihazı.....	13
Şekil 2.10 : RTFOT (a) ve PAV (b) cihazları.....	19
Şekil 2.11 : DSR cihazı ve hazırlanan numuneler.....	19
Şekil 2.12 : DSR deney düzeneği ve numunelerde meydana gelen deformasyon	20
Şekil 2.13 : Bağlayıcının viskoelastik davranışı	21
Şekil 3.1 : Siyah Karbon.....	40
Şekil 4.1 : Agrega gradasyon eğrisi.....	46
Şekil 4.2 : Karıştırma cihazı (a), modifiye bitümler (b).....	47
Şekil 4.3 : Bağlayıcıların penetrasyon değişimleri.....	48
Şekil 4.4 : Bağlayıcıların yumuşama noktası değişimleri.....	49
Şekil 4.5 : Bağlayıcıların düktülite değişimleri.....	50
Şekil 4.6 : PI değerinin katkı oranı ile değişimi.....	51
Şekil 4.7 : Bağlayıcıların kütle kayıplarındaki değişim.....	53
Şekil 4.8 : RTFOT sonrası bağlayıcıların penetrasyon değişimleri.....	54
Şekil 4.9 : RTFOT sonrası bağlayıcıların yumuşama noktası değişimleri.....	54
Şekil 4.10 : RTFOT sonrası bağlayıcıların PI değerleri.....	55
Şekil 4.11 : Bağlayıcıların 135 °C ve 165 °C sıcaklıklardaki viskozite değişimi.....	57
Şekil 4.12 : Bağlayıcıların viskozite-sıcaklık ilişkisi.....	58
Şekil 4.13 : Bağlayıcıların karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları.....	59
Şekil 4.14 : Orijinal bağlayıcıların G^* değerlerinin sıcaklıkla değişimi.....	60
Şekil 4.15 : Orijinal bağlayıcıların δ^o değerlerinin sıcaklıkla değişimi.....	61
Şekil 4.16 : Orijinal bağlayıcıların $G^*/\sin \delta$ değerlerinin sıcaklıkla değişimi.....	62
Şekil 4.17 : RTFOT ile yaşlandırılmış bağlayıcıların G^* değerlerinin sıcaklıkla değişimi.....	63
Şekil 4.18 : RTFOT ile yaşlandırılmış bağlayıcıların δ değerlerinin sıcaklıkla değişimi.....	64
Şekil 4.19 : RTFOT ile yaşlandırılmış bağlayıcıların $G^*/\sin \delta$ değerlerinin sıcaklıkla değişimi.....	65
Şekil 4.20 : PAV ile yaşlandırılmış bağlayıcıların G^* değerlerinin sıcaklıkla değişimi.....	66
Şekil 4.21 : PAV ile yaşlandırılmış bağlayıcıların δ değerlerinin sıcaklıkla değişimi.....	67
Şekil 4.22 : PAV ile yaşlandırılmış bağlayıcıların $G^*.\sin \delta$ değerlerinin sıcaklıkla değişimi.....	68
Şekil 4.23 : Bağlayıcıların sünme sertliği değerleri.....	69
Şekil 4.24 : Bağlayıcıların m değerleri.....	70
Şekil 4.25 : Marshall tokmağı.....	72
Şekil 4.26 : Marshall stabilite ve akma cihazı.....	72

Şekil 4.27 : Dp- Bitüm %'si	77
Şekil 4.28 : Stabilité- Bitüm %'si ilişkisi	77
Şekil 4.29 : Akma – Bitüm %'si.....	77
Şekil 4.30 : Vh- Bitüm %'si.....	78
Şekil 4.31 : VMA- Bitüm %'si.....	78
Şekil 4.32 : Vf- Bitüm %'si.....	78
Şekil 4.33 : SK katkı oranı ile stabilitenin değişimi.....	82
Şekil 4.34 : SK katkı oranı ile akma değerlerinin değişimi.....	82
Şekil 4.35 : Katkı oranının artışı ile MQ değerlerinin değişimi.....	83
Şekil 4.36 : RMS değerlerinin katkı oranına göre değişimi.....	84
Şekil 4.37 : Numunelere vakum uygulanması (a), Streç film ile sarılması (b).....	85
Şekil 4.38 : Numunelerin 60°C su banyosunda bekletilmesi (a).....	86
Şekil 4.39 : Karışımların ITS değerlerinin katkı oranı ile değişimi.....	88
Şekil 4.40 : Karışımların ITSr değerlerinin katkı oranı ile değişimi.....	88
Şekil 4.41 : Katkı oranının ile değişimi ITSM değerleri.....	90
Şekil 4.42 : Saf (B) karışım numunesinin toplam birim şekil değiştirme – zaman- deformasyon grafiği.....	91
Şekil 4.43 : B+%5SK numunesinin toplam birim şekil değiştirme - zaman - deformasyon grafiği.....	91
Şekil 4.44 : B+%10 SK numunesinin toplam birim şekil değiştirme - zaman- deformasyon grafiği.....	92
Şekil 4.45 : B+%15 SK karışım numunesinin toplam birim şekil değiştirme - zaman- deformasyon grafiği.....	92
Şekil 4.46 : B+%20 SK karışım numunesinin toplam birim şekil değiştirme - zaman - deformasyon grafiği.....	93
Şekil 4.47 : Numunelerin toplam birim şekil değiştirme- zaman grafiği.....	93
Şekil 4.48 : Katkı oranının değişimi ile sünme değerleri.....	94

SEMBOLLER ve KISALTMALAR

SK	: Siyah karbon
BSK	: Bitümlü sıcak karışım
PG	: Performans sınıfı
KGM	: Karayolları genel müdürlüğü
KTŞ	: Karayolları teknik şartnamesi
AASHTO	: Amerikan devlet karayolu ve ulaştırma birliği
DSR	: Dinamik kesme reometresi
RV	: Dönel viskozite
RTFOT	: Dönel ince film halinde ısıtma deneyi
PAV	: Basınçlı yaşlandırma kabı
BBR	: Kiriş eğme reometresi
ITSM	: Dolaylı çekme rijitlik modülü
ITSR	: Dolaylı çekme dayanım oranı
SUPERPAVE	: Yüksek performanslı asfalt kaplama
DDT	: Doğrudan çekme deneyi
RMS	: Kalıcı Marshall stabilitesi
MQ	: Marshall katsayısı
Gk	: Kaba agreganın özgül ağırlığı
Gi	: İnce agreganın özgül ağırlığı
Gf	: Fillerin özgül ağırlığı
V	: Karışım numunesinin hacmi
Dp	: Karışım numunesinin pratik özgül ağırlığı
Wa	: Agregada içerisindeki bağlayıcı yüzdesi
Ma	: Karışım içerisindeki agregada miktarı

M_b	:	Karışım içerisindeki bağlayıcı miktarı
W_b	:	Karışım içerisindeki bağlayıcı yüzdesi
G_b	:	Bağlayıcının özgül ağırlığı
D_t	:	Karışımın teorik özgül ağırlığı
VMA	:	Agregalar arası boşluk yüzdesi
V_f	:	VMA 'nın bağlayıcı ile doluluk oranı
G_{sa}	:	Agrega zahiri özgül ağırlığı
G_{se}	:	Agrega efektif özgül ağırlığı
S_m	:	BSK'nın rijitlik modülü
ITS	:	BSK'nın dolaylı çekme dayanımı
G^*	:	Kayma modülü
δ	:	Faz açısı

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

ATIK LASTİKLERDEN ELDE EDİLEN SİYAH KARBONUN BİTÜM VE BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIMLARA ETKİSİ

ZÜLFÜKAR AKSAĞAN

İnönü Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

102+xi sayfa

2021

Danışman: Doç. Dr. Tacettin GEÇKİL

Bu çalışmada; atık lastiklerden geri dönüşüm yoluyla elde edilmiş siyah karbonun (SK) bir katkı maddesi olarak bitüm ve bitümlü sıcak karışımların (BSK) özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla, B 160/220 penetrasyon sınıflı saf bitüme, bitüm ağırlığının %5, %10, %15, %20 oranlarında siyah karbon eklenerek modifiye bitümler hazırlanmıştır. Saf ve modifiye bağlayıcıların fiziksel özellikleri geleneksel testlerle, reolojik özellikleri ise dinamik kayma reometresi (DSR), kiriş eğme reometresi (BBR) ve dönel viskozimetre (RV) deneyleri ile belirlenmiştir. Siyah karbonun karışımların performans özelliklerine etkisini belirlemek amacıyla saf ve modifiye bitümler kullanılarak, Marshall karışım dizayn yöntemi ile BSK numuneleri hazırlanmıştır. Numuneler üzerinde Marshall Stabilite, Kalıcı Marshall Stabilitesi (RMS), Dolaylı Çekme Esneklik modülü (ITSM), Dolaylı Çekme Mukavemeti (ITS), Statik Sünme ve Sünme sertliği deneyleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre; siyah karbon katkısının bitüm modifikasyonunda kullanılmasıyla, katkı oranı artışıyla bağlayıcıların sertleşme eğilimi gösterdiği ve sıcaklık hassasiyetinin azaldığı görülmüştür. Ayrıca, SK katkısı ile bağlayıcıların yüksek ve düşük sıcaklıklardaki performanslarının arttığı görülmüştür. Karışım deney sonuçlarına göre, karışımların performans özelliklerinin özellikle %10-15 SK katkı aralığında iyileştiği görülmüştür.

ANAHTAR KELİMELELER: Bitüm, Siyah Karbon, Modifiye Bitüm, Bitümlü Sıcak Karışım, Marshall Stabilitesi

ABSTRACT

Master's Thesis

THE EFFECT OF BLACK CARBON OBTAINED FROM WASTE TIRES ON BITUMEN AND BITUMEN HOT MIXTURES

ZÜLFÜKAR AKSAĞAN

İnönü University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering

102+xi pages

2021

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Tacettin GEÇKİL

In this study, the effect of recycled carbon black (CB) obtained from waste tires on the properties of bitumen and bituminous hot mixes (BSK) as an additive was investigated. For this purpose, modified bitumens were prepared by adding carbon black in the ratios of 5%, 10%, 15% and 20% weight of the bitumen into pure bitumen with B 160/220 penetration class. Physical properties of pure and modified binders were determined by conventional tests, and rheological properties by dynamic shear rheometer (DSR), beam bending rheometer (BBR) and rotational viscometer (RV) tests. In order to determine the effect of carbon black on the performance properties of mixtures, BSK specimens were prepared by using pure and modified bitumens using Marshall mix design method. Marshall Stability, Permanent Marshall Stability (RMS), Indirect Tensile Modulus (ITSM), Indirect Tensile Strength (ITS), Static Creep and Creep Stiffness tests were performed on the specimens. According to the results obtained; with the use of carbon black additive in bitumen modification, it has been observed that the binders tend to harden and temperature sensitivity decreases due to the increase in the additive ratio. In addition, it has been observed that the performance of the binders at high and low temperatures is increased with the CB additive. According to the mixture test results, it has been seen that the performance properties of the mixtures improved especially in the 10-15% CB additive range.

KEYWORDS: Bitumen, Black Carbon, Modified Bitumen, Bituminous Hot Mix, Marshall Stability,

1. GİRİŞ

İnsanlık tarihinin başladığı ilk dönemlerden itibaren canlı ve cansız varlıkların ulaşımı en temel ihtiyaçların başında gelmektedir. Tarihin çeşitli dönemlerinde denizyolları ve iç suyolları ulaşım sistemlerine hâkim iken daha çok sanayi devriminden itibaren demiryolu taşımacılığı ön plana çıkmıştır. Ham petrolün işlenmesi ve motorlu araçların icat edilmesi ile birlikte 20. yüzyılda karayolu taşımacılığı ön plana çıkmıştır. Günümüzde karayolu taşımacılığı dünyada ve Türkiye’de hâkim ulaşım sistemi haline gelmiştir.

Türkiye Cumhuriyetinin kurulduğu günlerde 18000 km vasat bir halde bulunan karayolu ağıımız günümüz şartlarında 69000 km ye ulaşmış durumdadır. Ülkemizdeki karayolu ağının tamamına yakını, gelişmiş ülkelerde de tercih edilerek kullanılan bir kaplama türü olan esnek kaplamalardan oluşmaktadır. Özellikle son yıllarda ekonomik şartların elverdiği ölçüde yollarımızın sathi kaplama yerine bitümlü sıcak karışım (BSK) kaplama olarak yapılmasına hız verilmiştir. Maliyetinin yüksek olması nedeniyle BSK’ ların içeriğini oluşturan bitüm ve agregaların özellikleri, oluşturulan yolun kullanım ömrünün fazla olması ve konforun yüksek olması açısından büyük önem arz etmektedir. BSK’ da %4-6 civarında olan bitümlü bağlayıcının içeriği az olmasına rağmen maliyet ve performans açısından ciddi önemi bulunmaktadır. Termoplastik bir malzeme olan bitüm vizkoelastik bir davranış göstererek çevresel koşullara bağlı olarak farklı davranış göstermektedir. Bitümün bu davranışı, farklı trafik ve çevre koşulları sebebiyle BSK kaplamalarda zamanla çeşitli bozulmalar meydana getirmektedir. BSK kaplamalarda oluşan bozulmaları en aza indirmek, bakım ve maliyetlerini azaltmak ve performansını arttırmak amacıyla bağlayıcı veya karışım içerisine çeşitli ticari ve atık katkı maddeleri ilave edilerek kaplamalar güçlendirilmeye çalışılmaktadır [1].

Günümüzde, teknolojinin gelişimi ve nüfusa bağlı olarak, birçok atık malzeme oluşmaktadır. Ortaya çıkan atıkların sağlıksız bir şekilde depolanması çevre kirliliği ve maliyet problemleri doğurmaktadır. Son yıllarda atık malzemelerin bertaraf edilip kullanıma yeniden kazandırılmasını amaçlayan birçok çalışma yapılmaktadır.

Dünyada taşıt kullanımının artmasıyla birlikte araç lastiği tüketimi artmakta ve buna bağlı olarak atık lastik birikimi oluşmaktadır [3]. Atık lastiklerin doğal ortamlarda depolanmaları

halinde kontrolü mümkün olmayan yangınlar ve buna bağılı zehirli gaz açığı çıkması, yeraltı ve yerüstü su kaynaklarının kirlenmesi gibi sonuçlar oluşmaktadır.

Türkiye’de yılda yaklaşık 300.000 ton dolaylarında atık lastik ortaya çıkmaktadır ve bu lastiklerin yeniden kullanımı ülke ekonomisi ve çevresel açıdan önem arz etmektedir. Atık lastikler parçalanmamış haliyle iskelelerde, açığı çıkardığı enerji yönünden fabrikalarda yakıt olarak, çeşitli dolgularda kullanılmaktadır. Granül halinde ise oyun parkları, yürüyüş yolları, spor sahaları zeminlerinde kullanılması sıklıkla karşımıza çıkmaktadır [2]. Ülkemizde ömrünü tamamlamış lastiklerin yönetimi 26357 sayılı resmi gazetede yayımlanan “Ömrünü Tamamlamış Lastiklerin Kontrolü Yönetmeliğı” ile belirlenmekte olup bu yönetmelik ile ömrünü tamamlamış lastiklerin geri kazanımı esas alınmaktadır. Ayrıca yapılacak olan bertaraf işlemleri bu yönetmelik ile atık lastiklerin çevre üzerinde olumsuz etki yaratmadan yapılması öngörülmektedir.

Bu kapsamda, karayolu inşaatında kullanılan aynı zamanda doğal olarak elde edilen agrega ve bitümün yerine zaman içerisinde rezervlerin azalması sebebiyle çeşitli maddelerin geri dönüşümünün alternatif olarak kullanımı önem kazanmaktadır.

Bu tez çalışmasında, atık lastiklerden piroliz yoluyla elde edilmiş siyah karbonun bitüm ve bitümlü sıcak karışımlar üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

Bu sebeple; çalışmanın ikinci bölümünde bitümlü sıcak karışımlar (BSK) hakkında ayrıntılı bilgi verilmiş olup BSK kaplamalardan beklenen özellikler, kaplamada meydana gelen bozulmalar ve BSK kaplamalara uygulanan deneylere yer verilmiştir.

Çalışmanın üçüncü bölümünde, bitüm ve bitümlü sıcak karışımların özelliklerinin iyileştirilmesinde kullanılan modifiye maddeler ve bu maddelerin etkilerinden bahsedilmiştir. Bir geri dönüşüm malzemesi olan siyah karbonun kullanım alanları ve bu maddenin yapısından bahsedilmiş olup yapılan çalışmalar incelenmiştir.

Çalışmanın dördüncü bölümünde, uygulamalar kısmına geçilmiş olup; öncelikle kullanılacak bağlacının fiziksel özellikleri belirlenmiştir. Sonrasında ise karışımda kullanılacak agrega ve karışım oranlarından bahsedilmiştir. Modifiye malzeme olarak kullanılan siyah karbon ile modifikasyon işlemi yapılması ve çeşitli performans deneylerinin yapılması hususuna değinilmiştir. Daha sonra ise Marshall dizayn yöntemi doğrultusunda yapılan deneysel çalışmalar anlatılarak; optimum bitüm içeriğı hesap edilmiş, karışım numuneleri hazırlanmış ve bu numuneler üzerinde çeşitli performans deneyleri yapılarak sonuçları değerlendirilmiştir.

Çalışmanın beşinci bölümünde ise yapılan tüm deneysel çalışmalar değerlendirilerek yorumlanmıştır.

2. BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIMLAR

Ülkemizde gelişmiş ülkelerde olduğu gibi karayolu üstyapısı esnek kaplama olarak tasarlanmakta ve uygulanmaktadır. Esnek kaplamalar, daha düşük trafik yoğunluğuna sahip yollar için sathi kaplama, ancak daha yüksek trafiğe sahip yollar için bitümlü sıcak karışım (BSK) kaplama olarak inşa edilmektedir. Bitüm ve agrega karışımından meydana gelen BSK kaplamalar genellikle binder ve aşınma tabakasından oluşmaktadır. Kaplama tabakasının genel olarak düzgün bir yuvarlanma yüzeyi oluşturmak ve üzerine gelen yükleri alt tabakalara iletmek gibi görevleri mevcuttur. BSK kaplamalar yüksek standartlı yol üstyapısı olarak tasarlanmakta ve genel olarak standart dingil yükü sayısı 3×10^6 'dan yüksek olan yollar için uygulanmaktadır [1].

2.1 Bitümlü Sıcak Karışımlarda Kullanılan Agregalar

BSK'ların içerisinde ağırlıkça %90-95 oranında bulunan agregalar kırmataş, dere malzemesi, cüruf ve atıklardan oluşan taneli malzemelerdir. Agregaların mekanik özellikleri BSK kaplamaların performans özelliklerine etki etmektedir. Agregaların şekli, mineral yapısı, yüzey alanı, gradasyonu ve boşluk miktarı gibi özelliklerinin bilinmesi BSK kaplamanın yapısı ile ilgili bilgi vermektedir [4].

2.1.1 Agregaların özellikleri

Karayolu mühendisliğinde kullanılan hammaddelerin başında agregalar gelmektedir. Karayolu üstyapısında kullanılan agregalar taşıyıcı sistemin en önemli parçasıdır. Agregaların özelliklerinin bilinmesi hangi agreganın hangi tabakada kullanılacağı hakkında bilgi vermektedir.

2.1.1.1 Mineralojik yapı

Karışımda kullanılan agregalar genel itibariyle kırma taş, dere malzemesi ve suni yollarla elde edilmiş taşların parçalanması ile temin edilmektedir. Dere malzemeleri

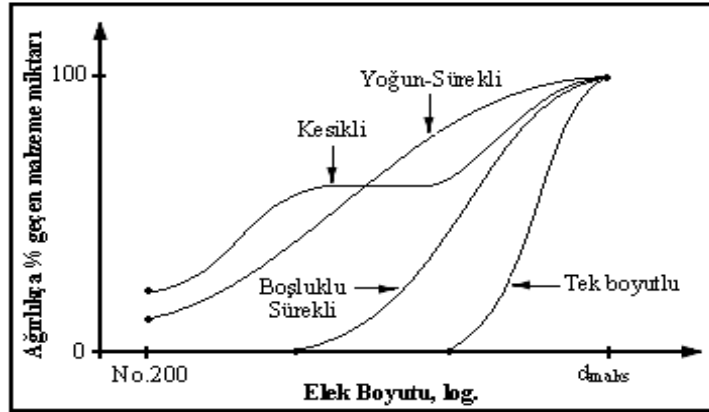
yüzey pürüzlülüğü az olduğundan ve bitüm ile iyi bir adezyon sağlayamadığından tercih edilmemektedir. BSK kaplamalarında çoğunlukla taş ocaklarında konkasörler yardımıyla kırılan agregalar olan kırma taşların kullanılması tavsiye edilmektedir [4].

2.1.1.2 Boyut

Karayolu mühendisliğinde agregalar tane boyutlarına göre üç ayrı şekilde sınıflandırılmaktadır. 4,75mm elek üzeri agregalara iri agregaya; 4,75mm (No:4) elekten geçen ve 0,075mm (No:200) elekte kalan agregalara ince agregaya; 0,075mm eleğin altında kalan kısımda oluşan agregalara da filler denilmektedir [5].

2.1.1.3 Gradasyon

Agrega karışımındaki danelerin boyutlarına göre dağılımını ifade eden gradasyon, karışımın işlenebilirlik ve stabilite gibi özelliklerine ciddi etkiler yapmaktadır. Agregalar, gradasyon sınıflandırması yönünden Şekil 2.1’ de görüldüğü üzere kesikli, yoğun-sürekli, boşluklu-sürekli ve tek boyutlu gradasyon olarak dört sınıfta incelenmektedirler [6].



Şekil 2.1 : Agregada Gradasyon Tipleri [5]

Maksimum dane boyutu birbirinden farklı olan agregaların, işlenebilirliği de farklı olabilir. Genel itibariyle tabaka kalınlığı ile ilgili olarak verilen karışım tipindeki agreganın maksimum boyutu arttıkça yani karışımındaki iri agregaya miktarı arttıkça, karışımın sıkıştırılması da o kadar zorlaşır. Sıcak karışımlarda tekerlek izinde oturmaya

karşı dayanımı iyileştirmek amacıyla yoğun sürekli gradasyona sahip agrega karışımı kullanılmalıdır [6].

2.1.1.4 Porozite

Porozite agrega ile asfalt arasındaki adezyonun sağlanması için önemli bir parametredir. Porozitenin artmasıyla birlikte bitüm adezyonu artış göstermektedir. Ancak porozitenin %2-2,5 dan fazla olması durumunda ise karışım için asfalt bağlayıcı ihtiyacı artacak ve bu durum ekonomik olmadığı gibi terleme-kusma riskini de beraberinde getirecektir. Bu sebeplerden dolayı çok poroz olan veya poroz olmayan agregaların kullanımı uygun olmamaktadır [7].

2.1.1.5 Yüzey alanı ve boşluk oranı

Agrega danelerinin yüzey alanları ve daneler arasında kalan boşluk miktarları, karışıma etki eden parametreler olarak gösterilmektedir. Boşluk hacmi ve toplam yüzey alanı, dane çapı, biçimi ve gradasyona bağlıdır [5].

2.1.1.6 Yüzey yapısı ve biçim

Agregaların yüzey yapısı, pürüzlülük ve cilalanma ile ilgilidir. Agregaların pürüzlülük miktarı arttıkça işlenebilirlikleri azalmakta, karışıma girecek bitüm oranı artmakta ayrıca agregaların kohezyon artmaktadır. Bu sebeple daha az pürüzlü olan cilalanmış agregalar BSK'lar için uygun görülmemektedir. Dane biçimleri, işlenebilirliğe, yoğunluğa, stabiliteye ve kayma mukavemetine etki etmektedir. Dane biçimi olarak agregalar; yuvarlak, köşegen, düzensiz ve yassı, ince-uzun olarak sınıflandırılmaktadır. Yuvarlak biçimli agregaların işlenebilirliği köşelilerden daha fazla olmasına rağmen stabilite bakımından köşeli olanlar daha dirençli olmaktadır [4].

2.1.2 Agregalara uygulanan deneyler

BSK'larda kullanılacak olan agreganın kullanılabilirliğinin tespit edilmesi için bazı deneyler yapılmaktadır. Bunlar; özgül ağırlık, aşınma, elek analizi, yassılık indeksi, hava tesirlerine karşı dayanıklılık, cilalanma ve su tesirlerine karşı dayanıklılıktır [4].

2.1.2.1 Elek analizi deneyi (ASTM C131 – TS 1900)

Karışım içerisinde bulunan agregaların tane dağılımı hakkında bilgi sahibi olmak için gerçekleştirilen bir deney olup kullanılan elekler (Şekil 2.2) aşağıdan yukarıya doğru elek genişliği artacak şekilde yerleştirilir. Daha sonra agrega yığın içerisinde alınarak en üstteki eleğe bırakılır. İki dakika boyunca sarsma cihazı veya el yordamıyla elenerek her elek üzerinde kalan malzeme tartılarak toplam agrega kütlelerine göre yüzdesi hesaplanır. Daha sonra her elek için % geçen değeri hesaplanarak malzemenin granülometri eğrisi çizilir.



Şekil 2.2 : Elek Analizi Deney Düzeneği [47]

2.1.2.2 Aşınma deneyi (Los Angeles) (TS EN 1097-2 - AASHTO T96)

Agregaların aşınmaya karşı dayanıklılığın tespiti için yapılan bir deneydir. Agregaya yığından alınan 5000 gr malzeme ve 11 adet çelik bilye dönel bir tambur içerisinde bırakılıp tamburun 500 devir döndürülmesiyle uygulanır. Deney sonunda tambur içerisinde çıkan malzeme elek açıklığı 1,7 mm'den daha büyük bir elekten elenerek elek üzerinde kalan malzemeler yıkanıp kurutulur. Agregadaki aşınma oranını hesaplamak için elek altında kalan malzeme toplam malzeme miktarına bölünür ve aşınma oranı hesaplanır [8]. BSK'larda kullanılan agregalarda bu oran aşınma tabakası için en fazla % 30 olmalıdır [9].

2.1.2.3 Özgül ağırlık deneyi (TS EN 1097-6)

Agregaların hacimsel değerlendirmesine bağlı olarak üç tip özgül ağırlık tanımı yapılmıştır. Bunlar; zahiri özgül ağırlık (SG_z), hacim özgül ağırlık (SG_H), doygun kuru yüzey özgül ağırlık (SG_{DKY})'dır.

Agregalarda hava ile temas halindeki boşluklar ve hava ile temas halinde olmayan katı hacmin içerisindeki boşluklar bulunmaktadır. Bunlar su absorbe edebilen ve edemeyen boşluklar olarak tanımlanmaktadır. Hava ile temas edebilen boşluklara su dolduğu zaman agrega danesinin ağırlığı dolan suyun ağırlığı kadar artış gösterir. Bu nedenle agregalarda iki tip ağırlık ve üç tip hacim ağırlık hesaplanabilir. Denklem 2.1, 2.2 ve 2.3 yardımıyla agrega danelerinin özgül ağırlıkları, denklem 2.4 yardımıyla da su absorpsiyonu hesaplanır [7].

$$SG_z = (\text{Kuru agrega ağırlığı}) / (\text{Katı ve geçirgen olmayan boşlukların hacmi}) \quad (2.1)$$

$$SG_H = (\text{Kuru agrega ağırlığı}) / (\text{Tüm hacim}) \quad (2.2)$$

$$SG_{DKY} = (\text{Doygun kuru yüzey ağırlığı}) / (\text{Tüm hacim}) \quad (2.3)$$

$$\% \text{ Absorpsiyon (Su Emme)} = [(B-A) / A] \times 100 \quad (2.4)$$

A: Agreganın etüvde kurutulduktan sonraki ağırlığı

B: 24 saat su içinde bekletilen agreganın kuru yüzey doygun ağırlığı

2.1.2.4 Hava tesirlerine karşı dayanıklılık deneyi (TS EN 1367-1)

Hava tesirleri altında uzun süre kalan agregaların donma ve çözülmeye karşı mukavemetlerinin ölçülmesinde kullanılan hızlandırılmış bir deneydir. Agregası, magnezyum sülfat ($MgSO_4$) çözeltisi içerisinde daldırılarak oda sıcaklığında 16-18 saat bekletilmektedir. Bu süre bitiminde çözeltiden çıkarılan numuneler 15 dakika süzölmeye bırakılarak daha sonra 110 °C sıcaklıktaki bir etüvde kurutulur. Bu işlem 5 defa tekrarlanır ve 5. devre sonunda etüvden çıkarılan malzeme soğutulup, yıkanır ve kurutulur. Eleme işlemi yapılarak donma kaybı tespit edilir [4].

2.1.2.5 Cilalanma deneyi (TS EN 1097-8)

Agregaların trafik altında sürtünme yoluyla ne kadar cilalanma göstereceğini belirlemek amacıyla yapılır. Laboratuvarda ortam koşulları sağlanmak şartıyla oluşturulan cihaz

yardımıyla 10 mm'lik elekten geçip 10-14 mm'lik yassılık eleğinde kalan agregalar kullanılır [10]. Bu agregalar, cilalandırma makinesinde 6 saat süreyle hızlandırılmış aşınmaya tabi tutulur. Bulunan kayma direnci ilk kayma direncine oranlanıp cilalanma katsayısı bulunur [11]. BSK aşınma tabakalarında minimum cilalanma katsayısının %50 olması gerekmektedir [9].

2.1.2.6 Soyulma mukavemeti deneyi (ASTM D 1664)

Soyulma; yetersiz drenaj, sıcaklık ve trafik etkisiyle agrega üzerinden bağlayıcının ayrılmasıdır. Bu deney ile su ve sıcaklığın etkileriyle bitümün agregaya yapışma kabiliyetindeki değişiklikler gözlemlenir. Deneyde, yıkanıp etüve kurutulmuş malzemeye bağlayıcı eklenerek karıştırılır ve 24 saat boyunca 60 °C etüve bırakılır. Daha sonra etüvden alınan karışım ısıtılarak daha genişçe bir kaba koyulur ve tekrar 24 saat boyunca 60 °C sıcaklıkta bekletilir. Deney sonunda soyulmaya karşı dayanım soyulmayan yüzeyin tüm yüzeye oranı olarak bulunur [11]. Aşınma tabakası için bu değer minimum %50'dir [12].

2.1.2.7 Yassılık ve incelik-uzunluk tayini (BS 812)

Maksimum boyutunun minimum boyutuna oranı 5 den büyük olan agregalar yassı ve ince-uzun olarak kabul edilir. Bu agregalar BSK'lar içerisinde yük altında yassı olmayan daha üniform boyutlanmış agregalara göre farklı davranış sergileyeceği, daha düşük dayanım göstereceği ve gradasyonun bozulmasına sebep olacağı için kullanılmamalıdır [5].

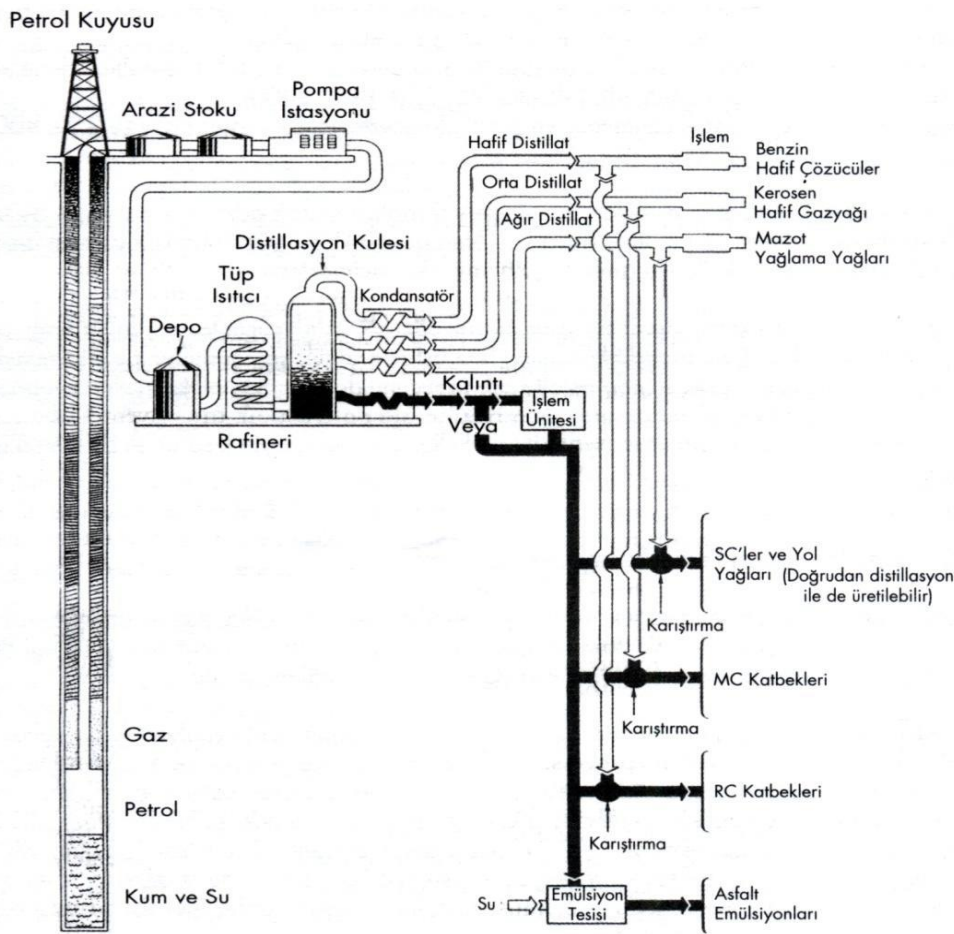
2.2 Bitümlü Sıcak Karışımlarda Kullanılan Bağlayıcılar

BSK'ların ağırlıkça %4-6'sını oluşturan bitüm, koyu kahve ile siyah renk arasında değişen petrolün damıtılması yoluyla elde edilen veya doğal kökenli olarak temin edilen bir bağlayıcıdır [7]. “Asfalt”, “asfalt çimentosu”, “bitüm” ve “asfalt bağlayıcı” terimleri yol mühendisliğinde aynı anlama gelecek şekilde kullanılmaktadır [1]. Bağlayıcılar, agrega danelerini birbirine bağlayarak trafik etikisi altında kaplamanın dağılmasını engelleyerek geçirimsizlik ve kaplamanın stabilitesini arttırarak sürüş konforu sağlar [10].

Bitümlü bağlayıcılar esas olarak asfaltlar ve katranlar olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Asfaltlar, doğal ve yapay asfaltlar olmak üzere iki kısımda incelenmektedir [10].

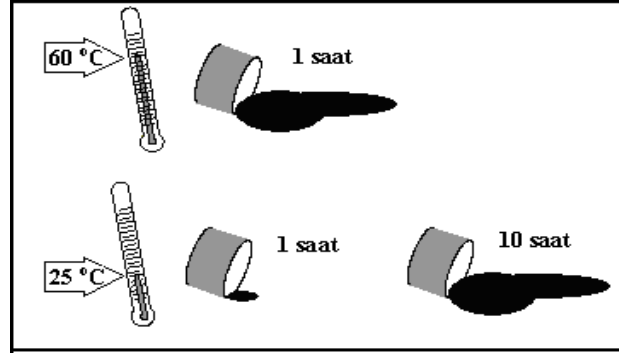
Doğal asfaltlar; temin edildikleri yere göre göl veya kaya asfaltı olarak genellikle mineral maddelerle karışmış halde bulunurlar. Trinidad göl asfaltı Venezuela sınırları içerisinde 10-15 milyon ton rezervi bulunan rafine edilerek %55 asfalt içeren en bilinen göl asfaltı türüdür. Bir diğer doğal asfalt türü olan kaya asfaltları ise Gilsonite ve Unitaite olarak bilinen maksimum %12 bitüm içeren bir bağlayıcı türüdür [10].

Ham petrolün damıtılması ile elde edilen yapay asfaltlar ise, damıtma işleminde (Şekil 2.3) distilasyon kulesinin en alt kısmında kalıntı halinde kalmasıyla elde edilir [8].



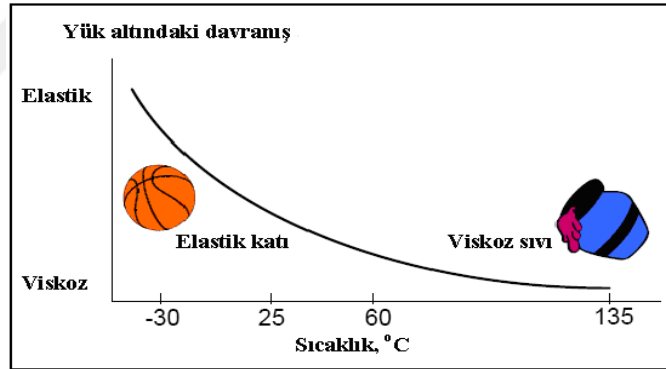
Şekil 2.3 : Ham petrolün damıtılmasıyla elde edilen asfaltlar [6]

Asfalt, viskoelastik bir davranış gösteren termoplastik bir malzeme olup trafik yükleri altında yükün şiddeti, ortam sıcaklığı ve zamana bağlı olarak farklı davranışlar gösteren bir bağlayıcıdır [4]. Şekil 2.4'de asfaltın farklı sıcaklık ve zamana göre değişimi gösterilmiştir.



Şekil 2.4 : Bitümün farklı sıcaklık ve zamana göre değişimi. [5]

Şekilde görüldüğü gibi aynı süre ve farklı sıcaklıklardaki bitümün davranışlarının farklılık gösterdiği görülmüştür. Asfalt düşük yük altında viskoz, ağır yükler altında ise elastik özellik göstermektedir. Bu nedenle sıcaklık ve yükleme süresi karışımın rijitliğinde önemli bir faktördür [1]. Şekil 2.5’de asfalt kıvamının sıcaklıkla değişimi gösterilmiştir.



Şekil 2.5 : Asfaltın sıcaklıkla değişimi. [1]

2.2.1 Asfalt bağlayıcılara uygulanan geleneksel deneyler

Asfalt bağlayıcıların fiziksel özelliklerinin belirlenmesi için çeşitli geleneksel deneyler yapılmaktadır. Bu deneyler; penetrasyon, yumuşama noktası, duktilite, parlama noktası, ısıtma kaybı ve özgül ağırlık deneyleridir. Geleneksel olarak değerlendirilen bu asfalt bağlayıcı deneyleri Çizelge 2.1’de verilmiştir.

Çizelge 2.1 : Geleneksel Asfalt Bağlayıcı Deney Yöntemleri [3]

Test Tipi	Standart Koşullar	Deney Standartı
Penetrasyon	25 °C, 5sn, 100gr	ASTM D5-AASHTO T49 EN 1426- TS 118
Yumuşama Noktası	-	ASTM D36- EN 1427- TS 120
Düktilite	25 °C, 5cm/dak	ASTM D113- AASHTO T5 TS 119
Parlama Noktası	-	ASTM D113- AASHTO T5 TS 119
Çözünürlük	-	ASTM D2042- AASHTO T44 TS 1090
Kinematik Viskozite	135 °C	ASTM D2170- AASHTO T201 EN 12595
Isıtma Kaybı (TFOT)	163 °C, 5 saat	ASTM D1754- AASHTO T179
Isıtma KaaakKKaybı (RTFOT)	163 °C, 75 dak	ASTM D2872- AASHTO T240
Özgül Ağırlık	25 °C	TS 1087- ASTM D70

2.2.1.1 Penetrasyon deneyi (TS 118, TS EN 1426, ASTM D5)

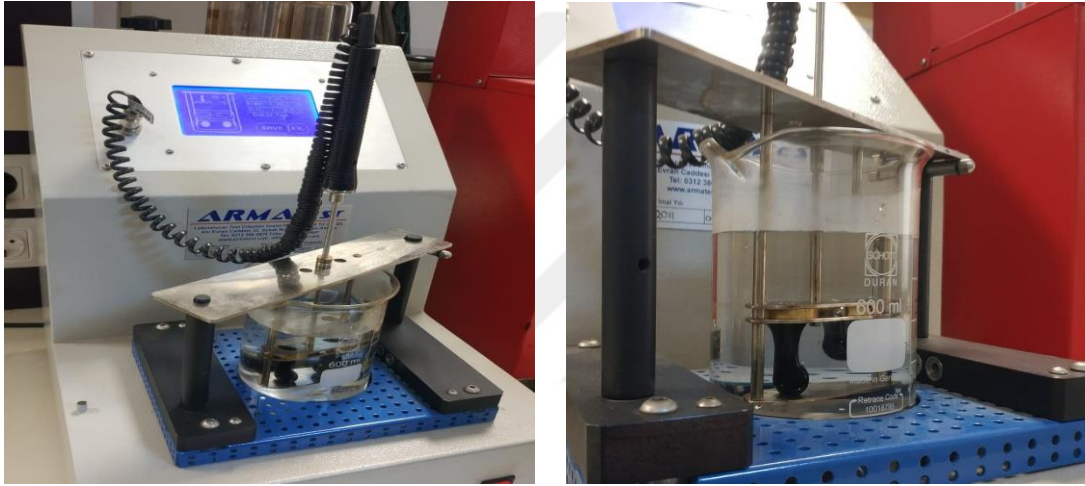
Asfalt bağlayıcıların ortam sıcaklığındaki kıvamlarını belirlemek için yapılan deneydir. Bu deney sırasında standart bir iğne 100 gr yük altında 5 sn boyunca 25 °C deki asfalt numunesine düşey olarak batma miktarı ölçülmektedir. Her 0,1 mm batma miktarına bir penetrasyon değeri denilerek penetrasyon değeri hesaplanır. Penetrasyon deneyi ile kıvam durumu saptandığı gibi aynı zamanda asfaltın sınıfı da belirlenmektedir. Penetrasyon değeri arttıkça adezyon artar, viskozluk ve katılık azalır. Penetrasyon deney cihazı Şekil 2.6'da verilmiştir [7].



Şekil 2.6 : Penetrasyon Cihazı.

2.2.1.2 Yumuşama noktası deneyi (TS 120, TS EN 1427, ASTM D36)

Yumuşama noktası deneyi bitümün sıcaklığa karşı duyarlılığını ölçmek için yapılan bir deneydir. Standart çap (23 mm) ve kalınlık (6,4 mm) içerisinde olan bir yüzük halka içerisinde koyulan asfalt numunesi üzerine standart çapta (9,6 mm) bilye yerleştirilerek yapılır. Deney, başlangıç sıcaklığı 5 °C olan suyun içerisinde yerleştirilen yüzüklerin içerisindeki asfalt bilyelerin ağırlığı ve içinde bulunduğu suyun sıcaklığının artırılması sonucu bilyelerin halka içerisinden geçerek tabana değmesiyle sonuçlanır. Bilyenin tabana değdiği andaki sıcaklık değeri asfalt numunesinin yumuşadığı sıcaklık olarak kabul edilmektedir. Yumuşama noktası deney cihazı Şekil 2.7’de verilmiştir [7].



Şekil 2.7 : Yumuşama Noktası Cihazı.

2.2.1.3 Düktilite deneyi (TS 119, TS EN 12589)

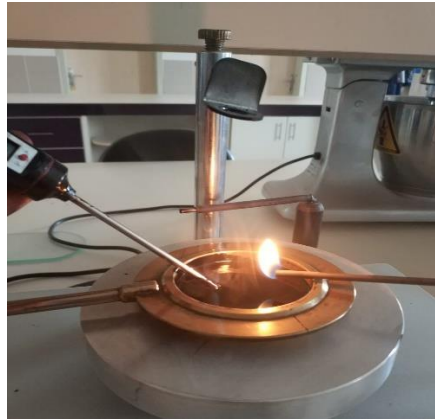
Düktilite deneyi, asfaltın yük altında kopmadan uzayabilme kabiliyetini göstererek karışımların kayma mukavemetine etkisini göstermektedir. Standart bir kalıp içerisinde şekillendirilen asfalt numunesi deney düzeneği ile su içerisinde 25 °C sıcaklıkta ve 5 cm./dak. hızla çekilerek sünmeye tabi olduğunda kopmanın gerçekleştiği uzunluk miktarıdır. Düktilite arttıkça adezyon yeteneği ve çekme mukavemeti artar, ısıya duyarlılık azalır. Azaldıkça ise büzölmeler (kırılganlık) artar. Düktilite cihazı Şekil 2.8’de verilmiştir [7].



Şekil 2.8 : Duktülite Cihazı.

2.2.1.4 Parlama noktası deneyi

Isıtılan asfaltın buharı ile alev temas ettirildiğinde yanma işlemi gerçekleşmeden önce geçici bir parlama gözlemlenir ve bu parlamanın gözlemlendiği en düşük sıcaklığa da asfaltın parlama noktası denir. Deney alttan ısıtmalı bir kap içerisine doldurulmuş asfaltın ısıtılması ile yapılmaktadır. Isıtılan asfaltın üst yüzeyinde bir alev ve sıcaklık ölçümü için termometre bulunmaktadır. Parlama ısısı sıcaklık etkisiyle buharlaşmaya başlayan bitümün alev ile birlikte geçici olarak parladığı fakat yanmadığı sıcaklıktır. Bu deneyde amaç, asfaltın emniyetli olarak hangi sıcaklık değerine kadar ısıtılabileceğidir [7]. Şekil 2.9’da parlama noktası cihazı verilmiştir.



Şekil 2.9 : Parlama Noktası Cihazı.

2.2.1.5 Özgül ağırlık deneyi (TS 1087)

Bitümlü malzemenin özgül ağırlığı 25°C sıcaklıktaki, hacminin havadaki ağırlığının aynı sıcaklık ve aynı hacimdeki havası alınmış suyun ağırlığına oranı olarak tanımlanmaktadır. Özgül ağırlık için piknometre metodu kullanılmaktadır. Deney başlangıcında boş bir kap tartılır ve daha sonra su ile doldurularak tekrar tartılır. Kabin içerisindeki su boşaltılarak belirli miktardaki bağlayıcı koyularak tekrar tartılır. Bu işlem esnasında bağlayıcı kap içerisine koyulurken kabarcık oluşmamasına dikkat edilir. Bağlayıcının üzerine ise kalan miktarda su koyularak tartım işlemi tekrarlanır. Deneyde uygun deney sıcaklığı 25 °C olup kullanılan suyun saf su olması gerekmektedir [13].

2.2.2 Asfalt bağlayıcılara uygulanan Superpave deneyleri

Geleneksel bağlayıcı deneyleri genellikle belirli deney sıcaklığında gerçekleştirilen ve çoğu ampirik olan deneylerdir. Bunun yanında, Superpave bağlayıcı şartnamesinin en temel özelliği ise yapılan deneylerin standart sıcaklıklarda değil, kaplamanın yapıldığı bölge sıcaklıklarında yapılarak arazi performansı ile doğrudan ilişkili reolojik ve fiziksel özelliklerinin analitik yöntemlerle tespit edilmesidir.

Asfalt bağlayıcılara uygulanan Superpave deneylerinde; plentte karıştırma ve taşıma sırasında meydana gelen kısa süreli yaşlanmayı tespit etmek için Dönel İnce Film Halinde Isıtma Deneyi (RTFOT), bağlayıcıların hizmet ömrü (8-10 yıl) boyunca meydana gelen uzun dönem yaşlanma Basınçlı Yaşlandırma Aleti (PAV), bağlayıcıların işlenebilirlik özelliklerinin belirlenmesi için Dönel Viskozimetre (RV), bağlayıcıların düşük sıcaklıklardaki termal çatlamlarına karşı dayanımını belirlemek için Kiriş Eğme Reometresi (BBR) ve bağlayıcıların yüksek sıcaklıklardaki kalıcı deformasyon direncini belirlemek için Dinamik Kayma Reometresi (DSR) deneyleri uygulanmaktadır. Uygulanan bu deneyler ve kullanım amaçları Çizelge 2.2'de verilmiştir [1].

Çizelge 2.2 : Superpave deneyleri ve amaçları [3].

Deney Adı	Kullanım Amacı
Dönel İnce Film Isıtma Deneyi	Kaplamanın kısa süreli yaşlanmasını belirlemek
Basınçlı Yaşlandırma Aleti (PAV)	Kaplamanın uzun süreli yaşlanmasını belirlemek
Dinamik Kesme Reometresi (DSR)	Bağlayıcının orta ve yüksek sıcaklıktaki özelliklerini belirlemek
Dönel Viskozimetre (RV)	Bağlayıcının yüksek sıcaklıktaki özelliklerini tespit etmek
Kiriş Eğme Reometresi (BBR)	Bağlayıcının düşük servis sıcaklık özelliklerini tespit etmek

Superpave yönteminde bağlayıcılar farklı sıcaklıklardaki göstermiş oldukları performansa göre sınıflandırılmaktadır. Bu tür bağlayıcılara “Performance Grade” Performans sınıfı ya da Performans Dereceli asfalt adı verilir ve PG simgesi ile gösterilir. Performans Dereceli (PG) bağlayıcılar, PG 58-16 gibi bir terminoloji kullanılarak ifade edilmektedirler. Buradaki ilk sayı olan 58 yüksek sıcaklık derecesini yani bu bağlayıcının gerekli fiziksel özelliklerini hizmet etmesi beklenen koşullardaki en yüksek kaplama sıcaklığına kadar taşıdığı anlamına gelmektedir. İkinci sayı olan -16 ise düşük sıcaklık derecesini göstermekte olup bağlayıcının gerekli fiziksel özelliklerini en düşük bu sıcaklığa kadar koruduğu anlamına gelmektedir.

Modifiye edilmiş ve saf asfalt bağlayıcılara uygulanan Superpave bağlayıcı şartnamesi Çizelge 2.3’de verilmiştir [1].

Çizelge 2.3 : Superpave Performans Esaslı Asfalt Bağlayıcı Şartnamesi. (AASHTO MP1) [15,16,17]

PERFORMANS SINIFI	PG 46-			PG 52-				PG 58-				PG 64-									
	34	40	46	10	16	22	28	34	40	46	16	22	28	34	40	10	16	22	28	34	40
Ortalama 7 Günlük Maksimum Kaplama Dizayn Sıcaklığı, °C	< 46			< 52				< 58				< 64									
Minimum Kaplama Dizayn Sıcaklığı, °C	> -34	> -40	> -46	> -10	> -16	> -22	> -28	> -34	> -40	> -46	> -16	> -22	> -28	> -34	> -40	> -10	> -16	> -22	> -28	> -34	> -40
ORIJİNAL BAĞLAYICI																					
Parlama Noktası, T48, Minimum, °C	230																				
Viskozite, ASTM D4402; Maksimum 3 Pa.s , Test Sıcaklığı, °C	135																				
Dinamik Kayma, TP5, G*/sinδ, minimum, 1.00 kPa, 10 rad/s , Test sıcaklığı, °C	46			52				58				64									
DÖNEL İNCE FİLM HALİNDE ISITMA DENEYİ (RTFOT) KALINTISI																					
Ağırlık Kaybı, Maksimum, %	1,00																				
Dinamik Kayma, TP5, G*/sinδ, minimum, 2.20 kPa, 10 rad/s, Test sıcaklığı, °C	46			52				58				64									
BASINÇLI YAŞLANDIRMA ALETİ (PAV) KALINTISI																					
PAV Deney Sıcaklığı, °C	90			90				100				100									
Dinamik Kayma, TP5, G*/sinδ, maksimum, 5000 kPa, 10 rad/s, Test sıcaklığı, °C	10	7	4	25	22	19	16	13	10	7	25	22	19	16	13	31	28	25	22	19	16
Fiziksel Sertleşme, Rapor																					
Sünme Sertliği, TP1, S,Maksimum, 300 MPa, m-değeri, minimum 0.300, Test sıcaklığı, °C	- 24	- 30	- 36	0	- 6	- 12	- 18	- 24	- 30	- 36	- 6	- 12	- 18	- 24	- 30	0	- 6	- 12	- 18	- 24	- 30
Direkt Çekme, TP3, minimum, %1.0 Test sıcaklığı, °C	- 24	- 30	- 36	0	- 6	- 12	- 18	- 24	- 30	- 36	- 6	- 12	- 18	- 24	- 30	0	- 6	- 12	- 18	- 24	- 30

Çizelge 2.3 (devamı): Superpave Performans Esaslı Asfalt Bağlayıcı Şartnamesi. [15,16,17]

PERFORMANS SINIFI	PG 70-						PG 76-						PG 82-					
	10	16	22	28	34	40	10	16	22	28	34	10	16	22	28	34		
Ortalama 7 Günlük Maksimum Kaplama Dizayn Sıcaklığı, °C	< 70						< 76						< 82					
Minimum Kaplama Dizayn Sıcaklığı, °C	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>		
	-	-	-	-	-	-	-10	-16	-22	-28	-34	-10	-16	-22	-28	-34		
ORJİNAL BAĞLAYICI																		
Parlama Noktası, T48, Minimum, °C	230																	
Viskozite, ASTM D4402; Maksimum 3 Pa.s , Test Sıcaklığı, °C	135																	
Dinamik Kayma, TP5, G*/sinδ, minimum, 1.00 kPa, 10 rad/s, Test sıcaklığı, °C	70						76						82					
DÖNEL İNCE FİLM HALİNDE ISITMA DENEYİ (RTFOT) KALINTISI																		
Ağırlık Kaybı, Maksimum, %	1,00																	
Dinamik Kayma, TP5, G*/sinδ, minimum, 2.20 kPa, 10 rad/s, Test sıcaklığı, °C	70						76						82					
BASINÇLI YAŞLANDIRMA ALETİ (PAV) KALINTISI																		
PAV Deney Sıcaklığı, °C	100 (110)						100 (110)						100 (110)					
Dinamik Kayma, TP5, G*/sinδ, maksimum, 5000 kPa, 10 rad/s, Test sıcaklığı, °C	34	31	28	25	22	19	37	34	31	28	25	40	37	34	31	28		
Fiziksel Sertleşme,	Rapor																	
Sünme Sertliği, TP1, S, Maksimum, 300 MPa, m-değeri, minimum 0.300, test sıcaklığı, °C	0	-	-	-	-	-	0	-	-	-	-	0	-	-	-	-		
	6	12	18	24	30	0	-	-	-	-	-	0	-	-	-	-		
Direkt Çekme, TP3, minimum, %1.0 Test sıcaklığı, °C	0	-	-	-	-	-	0	-	-	-	-	0	-	-	-	-		
	6	12	18	24	30	0	-	-	-	-	-	0	-	-	-	-		

2.2.2.1 Dönel ince film halinde ısıtma kaybı deneyi (RTFOT)

Asfalt bağlayıcıların dolum, karıştırma ve yapım esnasındaki kısa süreli yaşlanma performansını temsil eden Dönel İnce Film Etüvü Deneyi (RTFOT) TS EN 12607-1 standartlarına göre yapılır. Deney düzeneği, 163 °C ısıya sahip bir etüv çerisinde silindirik cam şişeleri yerleştirmek için dönel tablalı bir taşıyıcı eleman ve hava üfleme yarayan bir üfleyici parçadan oluşur [1].

Bu deneye 163 °C sıcaklıktaki cihaz içerisine 8 adet cam şişenin her birine 35 gr bitüm doldurularak, düşeyde 15 devir/dakika hızla dönen tablanın içerisine yerleştirilmesiyle başlanır. Deneyin başlamasıyla, üfleyici tarafından dönen şişelerin içerisine 75 dakika boyunca 4000 ± 200 mL/dak hava üflenir. Hava ve sıcaklık ile birlikte şişelerin içerisindeki bitüm cam yüzeyde bir film tabakası oluşturarak yaşlanma meydana getirir. Deney sonunda iki şişe kütle kaybı için cihazdan çıkarılarak tartılır ve diğer özelliklerine bakılmak üzere diğer şişeler gibi boşaltılır [4]. Bağlayıcıda oluşan kütle kaybı, ilk ve son ağırlıkların arasındaki farkın ilk ağırlığa bölünmesiyle elde edilir. Çalışmada kullanılan deney cihazı Şekil 2.10(a)'da gösterilmiştir.

2.2.2.2 Basınçlı yaşlandırma kabı deneyi (PAV)

Basınçlı yaşlandırma kabı deneyi (PAV), asfaltın yoldaki hizmet ömrü boyunca maruz kaldığı uzun dönemli sertleşme ve yaşlanma özelliklerini belirlemek amacıyla yapılmaktadır [7].

AASHTO PP1 standardına göre yapılan bu deneyde her numune kabına 50 gram bağlayıcı koyulmaktadır. Bağlayıcı cinsine göre numunelere farklı sıcaklıklarda (90-100 ve 110 °C) 20 saat boyunca 2070 kPa'lık basınç uygulanmaktadır [4]. Deneyde kullanılan PAV cihazı Şekil 2.10 (b)'de gösterilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 2.10 : RTFOT (a) ve PAV (b) cihazları.

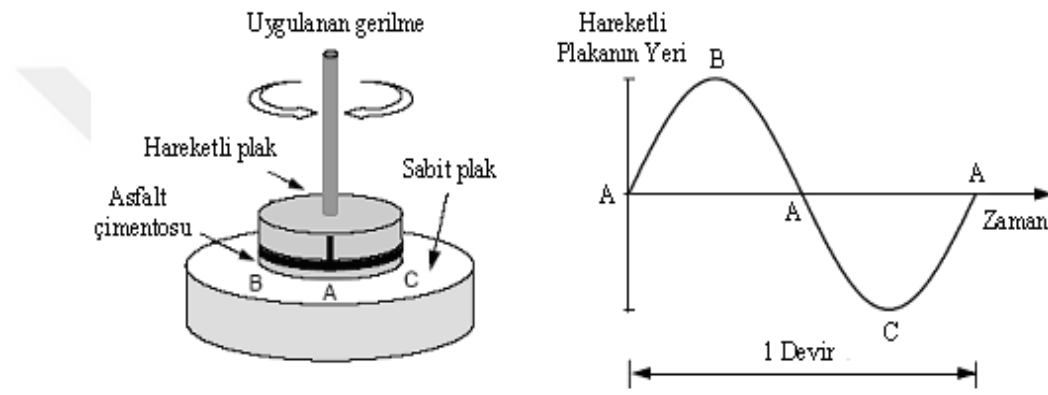
2.2.2.3 Dinamik Kesme Reometresi (DSR)

Bu deneyde, saf ve modifiye edilmiş bağlayıcıların yüksek sıcaklıklardaki tekerlek izi oluşumu ve orta sıcaklıklardaki yorulmaya karşı direncini belirlemek için yapılır. Yapılan deneyde tekerlek izine karşı mukavemetinin bulunması için orijinal (yaşlandırılmamış) ve RTFOT deneyi ile yaşlandırılmış numuneler; yorulmaya karşı dayanımını belirlemek için ise PAV deneyi ile yaşlandırılmış numuneler kullanılır. Orijinal ve RTFOT ile yaşlanmış bağlayıcıların deneye tabi tutulması için geçerli numune ebatları 25 mm. çapında ve 1000 mikron yüksekliğinde, PAV ile yaşlandırılmış bağlayıcıların 8 mm. çapında ve 2000 mikron yüksekliğinde olması gerekmektedir [19]. DSR deney düzeneği ve deney numuneleri Şekil 2.11’de gösterilmiştir.



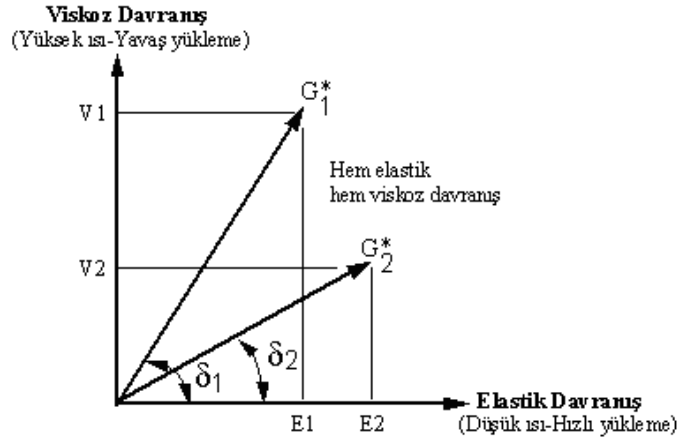
Şekil 2.11 : DSR cihazı ve hazırlanan numuneler.

Hareketli ve sabit plak arasına yerleştirilen bağlayıcı numune Şekil 2.12'deki gibi A noktasından B noktasına, daha sonra tekrar A noktasına, tekraren C noktasına gitmekte olup en sonunda A noktasına geri gelmektedir. Bu çevrime bir devir denmekte ve sistem bu şekilde devam etmektedir. Plağın dönme frekansı 1,59 devir/saniye olup deneyde 10 devirlik ön koşullandırma yapılır. Koşullandırma yapıldıktan sonra 10 devirlik sabit çevrim başlatılır [15]. Deney 46, 52, 58, 64, 70 ve 76 °C sıcaklıklarda gerçekleştirilmektedir. Deneyin yapıldığı düzenek ve deformasyon grafiği Şekil 2.12'deki gibidir.



Şekil 2.12 : DSR deney düzeniği ve numunelerde meydana gelen deformasyon [13]

DSR deneyi sonucunda bağlayıcı numunelerin viskoz ve elastik özelliklerini tespit etmek amacıyla bitümlü bağlayıcının karmaşık kayma modülü (G^*) ve faz açısı (δ) bulunur. G^* , tekrarlanan kayma gerilmelerinin oluşturduğu etkilere karşı bağlayıcının göstermiş olduğu toplam direnci, δ ise viskoz ve elastik deformasyonların bağıl miktarlarının bir göstergesidir [20]. Şekil 2.13'de bağlayıcılar yatayda elastik davranış, düşeyde ise viskoz davranış özelliklerini gösterir. Bağlayıcı numunelerin aynı olmaması ve viskoelastik özellik göstermesi amacıyla 1 ve 2 numaralı bağlayıcı numunelerin viskoz ve elastik faktörleri de birbirinden farklı olmalıdır. Viskoelastiklik, faz açısı ve kayma modülüne bağlı olmalıdır [7].



Şekil 2.13 : Bağlayıcının viskoelastik davranışı. [20]

Bağlayıcı malzemeler yüksek sıcaklıklarda viskoz özellik, düşük sıcaklıklarda ise elastik özellik gösterir. $\delta = 90^\circ$ için aşırı ısılarda asfalt yalnızca dikey ekseninde (viskoz davranış) gösterirken, G^* değeri yatay ekseninde okunmayacaktır. Aşırı düşük sıcaklıklarda ise elastik deformasyon gösteren asfaltın yalnızca yatay ekseninde okunacaktır. Bu nedenle G^* değeri $\delta = 0^\circ$ olacaktır. Asfalt bağlayıcı numuneleri viskoelastik özellikte olması ve her bir numunenin birbirinden farklı olması nedeniyle 1 ve 2 numaralı asfaltlar yükleme altında viskoz ve elastik özellikleri farklı olur [4].

Deney sonucunda G^* ve δ değerleri kullanılarak tekerlek izi dayanımını ifade eden $G^*/\sin \delta$ değeri bulunur. Bu değer orijinal bağlayıcılar için en az 1,00 kPa, RTFOT ile yaşlandırılmış bağlayıcılar için ise en az 2,20 kPa olmalıdır. Yüksek G^* ve düşük δ değerleri tekerlek izi direncinin artış gösterdiğini ifade eder [1].

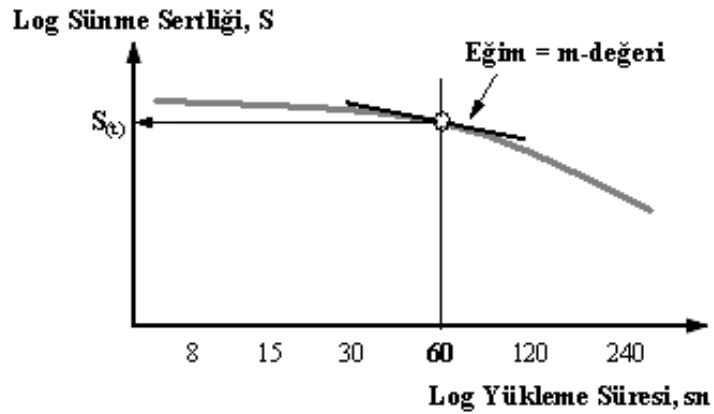
2.2.2.4 Kiriş Eğme Reometresi (BBR)

Kiriş eğme reometresi (BBR) deneyi asfalt bağlayıcıların düşük sıcaklıklardaki termal çatlamalara karşı direncini tespit etmek amacıyla PAV ile yaşlandırılmış bağlayıcılar üzerinde uygulanmaktadır. Deneyde bağlayıcılar üzerinde belirlenen sıcaklık ve sabit yükleme etkisinde, bağlayıcının düşük sıcaklıklarda göstereceği deformasyon ölçülmektedir. Deneyde kiriş şeklinde hazırlanan asfalt bağlayıcı numunesi, bağlayıcının sınıfına göre belirlenen düşük sıcaklıklarda özel bir sıvı içerisinde bekletilmektedir. Deney için Şekil 2.14'de görülen BBR deney düzeneği, hazırlanan kalıplar ve 6,35x127x12,7 mm. boyutlarındaki kiriş numuneleri kullanılır [15,19].



Şekil 2.14 : BBR cihazı, kalıplar ve hazırlanan numuneler.

Deney AASHTO TP1 standardına uygun olarak yapılmaktadır. Kiriş numunesinin ortasından 240 saniye süresince 980 mN'luk yük tatbik edilir. Yükleme ve deformasyon, bağlayıcının sünme derecesini bulmak için kullanılır [10]. Bulunan sünme sertlik derecesi ve buna bağlı sertlik değerinin zamanla değişimini ihtiva eden grafik oluşturulur. Bu grafik yoluyla m-değeri bulunmaktadır [1]. Şekil 2.15'de m-değerinin bulunduğu grafik gösterilmektedir.



Şekil 2.15 : m-değerinin belirlenmesi [19]

Superpave şartnamesine göre S değerinin 60 sn yükleme süresi için en fazla 300 MPa olması gerekmektedir. Deney sonucunda elde edilen bir diğer parametre olan m-değer

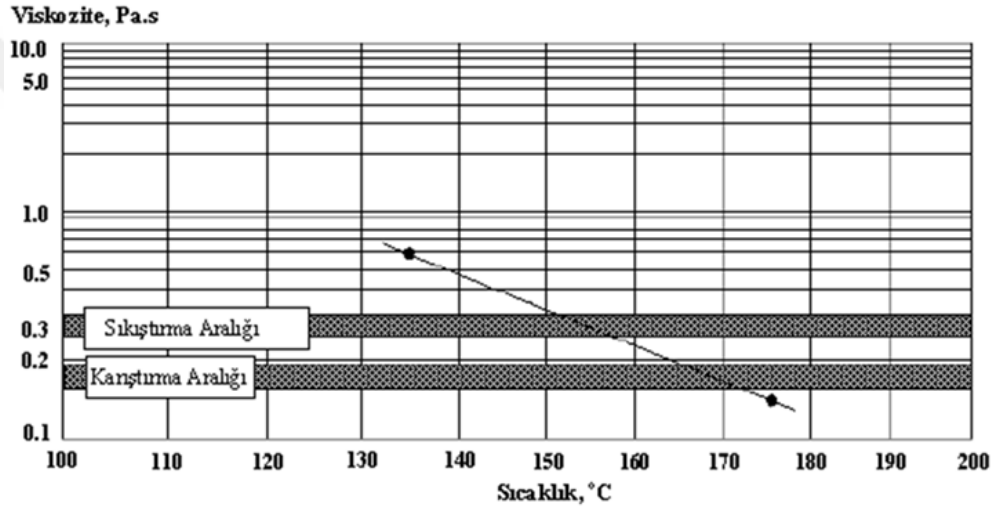
ise Şekil 2.15'deki gibi farklı yükleme zamanlarındaki sertlik ölçülerek elde edilen sertlik zaman grafiğinde 60 sn'deki teğetin eğimi olarak tanımlanmaktadır. Yüksek m-değeri daha düşük sert bağlayıcı anlamına geldiğinden kaplamada oluşan çekme gerilmeleri azalarak termal çatlaklar oluşmayacaktır. Bağlayıcı şartnamesine göre 60 sn yükleme sonunda m-değeri'nin en az 0,300 olması istenmektedir [1].

2.2.2.5 Dönel Viskozimetre Deneyi (RV)

Bağlayıcıların yüksek sıcaklık altındaki akışkanlık özelliklerini belirlemek amacıyla gerçekleştirilen bu deney AASHTO TP48 standardına uygun olacak şekilde "Brookfield Viskozimetresi" cihazı ile yapılmaktadır. Bağlayıcıların yüksek sıcaklıktaki viskozite değerleri, pompalanma ve karıştırma sırasında bağlayıcıların akışkanlaştıklarının tespit edilmesi için kullanılmaktadır. Deney düzeneğinde, bağlayıcı içerisinde 20 rpm hız ile eksen etrafında dönen bir milin, dönmeye karşı gösterdiği direnç ile viskozite değerleri belirlenmektedir. Saf bağlayıcılar üzerinde uygulanan RV deneyinde 135°C'deki viskozite değerlerinin 3 Pa.s'yi (3000 cP) geçmemesi istenmektedir. Deneyde bağlayıcıdan 30 gr. numune alınmakta ve sıcaklığı 150°C'den düşük olan etüvde ısıtılarak akışkan hale getirilmektedir. Bağlayıcıdan yaklaşık 11 gr. numune, bölmesine doldurulmakta ve numune bölmesi sıcaklığı sabit değere ulaşmış sıcaklık kontrollü kaba yerleştirilmektedir. Numuneler 15 dakika sabit ısıda bekletildikten sonra deney gerçekleştirilmektedir. Yaklaşık olarak eşit viskozite değerlerine erişildikten sonra üç adet okuma yapılır ve bu üç sonucun ortalamasından, bağlayıcının viskozite değeri elde edilmektedir. Deney 135 ve 165°C olmak üzere iki sıcaklıkta yapılmaktadır. Bu sıcaklıklardaki viskozite değerleri yardımıyla çizilen sıcaklık-viskozite grafiği yardımıyla bağlayıcıların karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları elde edilmektedir [18]. Şekil 2.16'da RV cihazı ve numunelerin doldurulduğu tüpler, Şekil 2.17'de sıcaklık-viskozite grafiği gösterilmiştir.



Şekil 2.16 : RV cihazı ve numunelerin doldurulduğu tüpler.



Şekil 2.17 : Sıcaklık-Viskozite Grafiği.

Şekil 2.17'de verilen Sıcaklık- Viskozite grafiğine göre şartnamede karıştırma için $0,17\pm 0,02$ Pa.s, sıkıştırma için ise $0,28\pm 0,03$ Pa.s viskozite aralıkları belirlenmiştir. Deney sonucunda 135 ve 165°C'de belirlenen viskozite değerleri grafikte işaretlenerek karıştırma ve sıkıştırma şartname aralıkları ile kesiştikleri yerler karıştırma ve sıkıştırma aralıkları olarak belirlenmektedir [1].

2.3 Bitümlü Sıcak Karışımlardan Beklenen Özellikler

Bitümlü sıcak karışım kaplamaların kalitesi, bünyesindeki malzemelerin (agrega, asfalt) özelliklerine doğrudan bağlı olduğundan bu özelliklerin kaplamaların etkisinin göz önünde bulundurulması gerekir. Bu nedenle BSK kaplamaların tasarımı yapılırken

stabilite, işlenebilirlik, durabilite, geçirimsizlik, yorulmaya ve kaymaya karşı direnç ve esneklik özellikleri dikkate alınmalıdır [7].

2.3.1 Stabilite

Stabilite; mukavemet ile ilişkili bir terim olup BSK olarak imal edilmiş bir kaplamanın trafik yükleri altında oluşacak deformasyonlara karşı gösterdiği dirençtir. BSK' nın stabilitesi düşük ise çökme, tekerlek izi ve ondülasyon gibi bozulmalar oluşur. Eğer yüksek ise rijit bir yapı oluşacağı için kaplamada çatlaklar meydana gelir [7].

2.3.2 Durabilite

BSK'da durabilite, çevre şartlarının ve trafiğin aşındırma etkilerine karşı kaplamanın direnç göstermesi olarak tarif edilmektedir. Kaplama; asfaltın yaşlanması, agreganın parçalanması ve soyulma gibi etkilere karşı dayanıklı olmalıdır [7].

2.3.3 Geçirimsizlik

Sıcak karışımın geçirimsizliği, karışımın içerisindeki hava boşluğu yüzdesi ile belirlenmektedir. BSK'nın üst kısmından alt kısmına kadar su, hava ve su buharının geçmesi sonucu oluşmaktadır. Geçirimsizlik artarsa asfaltın yaşlanması hızlı bir şekilde olur ve soyulmaya karşı direnci azalır. Sonrasında oluşacak donma çözünme ile kaplamanın parçalanması gerçekleşecektir [7].

2.3.4 İşlenebilirlik

İşlenebilirlik, karışımın serme ve sıkıştırma anında gösterdiği kolaylık olarak tarif edilebilir. Karışımın içerisindeki kaba agrega oranı arttıkça, kırmataş malzeme kullanıldıkça, filler miktarı aşırı arttıkça, kullanılan asfalt penetrasyonu azaldıkça azalmaktadır [4].

2.3.5 Esneklik

Kaplamanın alt kısmında bulunan zeminin ve temel tabakasının zaman içerisinde oturmaları sonucunda kaplamanın bu davranışa uyum sağlama kabiliyetidir. Asfalt içeriği ve agrega gradasyonu esnekliği etkilemektedir [1].

2.3.6 Yorulmaya karşı direnç

Trafik yüklerinin sebep olduğu deformasyonlara karşı kaplamanın gösterdiği dirençtir. Boşluk yüzdesi ve bağlayıcının viskozitesi yorulma direncini etkileyen sebeplerdir [4].

2.3.7 Kaymaya karşı direnç

Kayma direnci, aracın fren yaptığı sırada emniyetli bir şekilde duruş sağlaması için araç lastiği ile kaplama arasındaki sürtünme kuvvetidir. Düşük bitüm miktarı, cilalanma direnci yüksek agrega ile artış göstermektedir [5].

2.4 Bitümlü Sıcak Karışımlarda Meydana Gelen Bozulmalar

BSK'larda oluşan bozulmaların başlıca nedenleri; trafik ve çevre koşulları, yapım ve bakım hataları, kötü malzeme kullanımı, tasarım hataları ve denetimsiz bir şekilde seyreden aşırı yüklü taşıtların varlığıdır [4].

2.4.1 Tekerlek izi oluşumu

Sıcak hava koşullarında ve tekerrür eden ağır taşıt trafiğinin olduğu yollarda oluklanma şeklinde görülen en yaygın deformasyon türlerinden biridir. Yüksek ısı, ağır trafik yükü, yetersiz sıkışma, yetersiz temel tabakası kalınlığı ve aşırı asfalt filler yüzdesi tekerlek izi oluşumu sebeplerinin başında gelir [7]. Şekil 2.18'de kaplamada meydana gelen tekerlek izi deformasyonu gösterilmiştir.



Şekil 2.18 : Tekerlek İzi [48].

2.4.2 Yorulma çatlakları

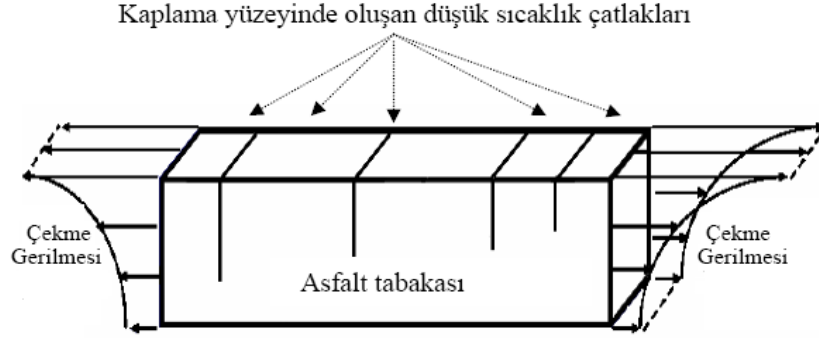
Ağır trafik yükleri altında tekerrür eden dingil yüklerinin etkisi ile zamanla yorulma çatlakları oluşmaktadır. Genel itibariyle kaplama tabakasının ince olması ve yetersiz drenaj gibi sebeplerle ortaya çıkmaktadır [14]. Şekil 2.19’da kaplamada meydana gelen yorulma çatlağı gösterilmiştir.



Şekil 2.19 : Yorulma Çatlağı [48].

2.4.3 Düşük sıcaklık çatlakları

Soğuk hava koşullarında kaplama tabakasının aşırı soğumasından dolayı büzülmesi sonucu meydana gelmektedir. Kaplama tabakasında artış gösteren çekme gerilmeleri trafik akış yönünün dikine çatlaklar oluşturmaktadır [4]. Şekil 2.20’de kaplamada meydana gelen düşük sıcaklık çatlaklarının oluşumu gösterilmiştir.



Şekil 2.20 : Kaplamada meydana gelen gerilmeler ve düşük ısı çatlakları [5].

2.4.4 Kusma

Kaplama içerisindeki asfaltın trafik ve sıcaklığın da etkisi ile yüzey kısmına doğru hareket ederek bu kısımda bir film tabakası oluşturması olayına kusma denir. Yüksek bitüm yüzdesi ve sıcaklık etkisiyle ortaya çıkmaktadır. Kaplamanın üst kısmına çıkan bitüm araç lastikleriyle olan sürtünmeyi düşürerek daneler arasında deplasman olmasını sağlamaktadır. Sık bir şekilde görülen bu bozulma türünün önlenmesi için bitüm miktarı ve boşluk yüzdesinin optimum değerinde olması sağlanmalıdır [14]. Şekil 2.21’de asfalt kaplamasında meydana gelen kusma gösterilmiştir.



Şekil 2.21 : Asfaltta Kusma [48].

2.5 Bitümlü Sıcak Karışımlarda Kullanılan Dizayn Yöntemleri

BSK’ ların tasarımında geleneksel ve geliştirilmiş dizayn yöntemleri olarak değerlendirilebilecek iki ana yöntem mevcuttur. Bunlar Marshall ve Superpave dizayn yöntemleridir [1].

2.5.1 Marshall dizayn yöntemi

BSK tasarımında Marshall Dizayn Yöntemi, 1939 yılında Bruce Marshall tarafından keşfedilen, ülkemizde ve dünyada yaygın olarak kullanılan yöntemdir [21].

Bu metod laboratuvar ortamında sıcak karışımların optimum bitüm yüzdesinin bulunmasında kullanılır. Marshall metodu BSK karışımlarda dane çapının max. 25 mm ve daha küçük boyutlardaki agregalara uygulanmakla beraber optimum bitüm değerinin bulunmasında, şartname değerlerine göre uygun gradasyon ve bitüm oranı belirlenmektedir. Belirlenen bitüm yüzdelere göre yüksekliği 63,5 mm ve çapı 101,6 mm olan deney numune serileri hazırlanır. Belirlenen bitüm yüzdelere en doğru sonucu bulabilmek için her yüzdeden 3 farklı briket numunesi hazırlanmalıdır. Laboratuvarda kalibrasyonu yapılmış olan Marshall Test Cihazına hazırlanan briket numuneleri sırasıyla yerleştirilerek stabilite ve akma değeri okunur. Marshall dizayn metodunda Stabilite- Akma testi ve Yoğunluk – Boşluk analizleri bu tasarım yöntemin iki ana prensibini oluşturur. Bu deney sonuçlarına istinaden Agregalar Arası Boşluk (VMA), Pratik Özgül Ağırlık, Hava Boşluğu Yüzdesi (Vh), Asfaltla Dolu Boşluk Yüzdesi (Vf), Akma değerlerinin bitüm yüzdesi ile değişim grafikleri çizilir. Bulunan stabilite ve yoğunluk grafiklerinin max. olduğu yerlere karşılık gelen bitüm yüzdesi, %70 bitümle dolu boşluk yüzdesi ve %4 hava boşluğu yüzdesine denk gelen bitüm yüzdeleri toplanarak bunların ortalama değerleri ile optimum bitüm yüzdesi bulunur. Bu değerlerin doğru olduğunun tespit edilmesi için şartname değerleriyle kontrol edilmesi gerekmektedir [9,22].

2.5.2 Superpave dizayn yöntemi

Geleneksel yöntemler ile hazırlanan BSK'lar arazi şartlarının değişmesi durumunda gerçek performanslarını sağlayamadıklarından dolayı yeni bir yöntem geliştirilmesi ihtiyacı doğmuştur. Geliştirilen bu yöntem ile kaplamanın maruz kalabileceği fiziki şartlar üretilen numunelere etki ettirilerek doğal şartların etkisi laboratuvarda oluşturulmuş olur. Superpave adı verilen bu yöntemin en kritik özelliği değişken sıcaklıklar göz önünde bulundurularak bağlayıcının performansının en yüksek olduğu değerlerin tespiti ve kaplamanın uygulanacağı bölgenin iklim koşulları ve sıcaklık değişimleri dikkate alınarak tasarlanmasıdır. Bu yöntem hem saf hem de modifiye

edilmiş asfaltların dizaynında rahatlıkla kullanılabilir. Yöntem karışım dizaynı ve bağlayıcı şartnamesi olmak üzere iki farklı kısımdan oluşur [1].

Superpave Karışım Yöntemi 7 adımdan oluşmaktadır. Bunlar:

- Bitüm seçimi
- Agregas seçimi
- Numunelerin hazırlanması ve sıkıştırma işlemi
- Performans deneyleri
- Yoğunluk ve hava boşluğu değerlerinin bulunması
- Optimum bitümün tayin edilmesi
- Nem hassasiyeti değerlendirmesi

Superpave karışım tasarımında kullanılan en önemli cihaz “Superpave Gratory Compactor” denilen Superpave yoğurmalı sıkıştırıcısı (SGC)’dir. Superpave yoğurmalı sıkıştırıcısı hacimsel analizler için karışım numunelerinin üretilmesi ve ayrıca numune üretilirken sıkıştırma işlemi boyunca verilerin kaydedilip numunenin yoğunluğunu ölçmek için kullanılmaktadır [1].

2.6 Bitümlü Sıcak Karışımlara Uygulanan Deneyler

Bitümlü sıcak karışımların performans özelliklerinin tespit edilmesi amacıyla sıcak karışım numuneleri üzerinde Marshall stabilite ve akma, dolaylı çekme yorulma deneyi, sünme deneyi, kalıcı Marshall stabilitesi (RMS), dolaylı çekme rijitlik modülü (ITSM) ve dolaylı çekme mukavemeti (ITS) deneyleri uygulanmaktadır.

2.6.1 Marshall stabilite ve akma deneyi (TS EN 12697-34)

BSK biriket numuneleri üzerinde uygulanan bu deney oluşabilecek deformasyona karşı en yüksek dayanımı (stabilite) ve en yüksek yüke ulaşılan seviyede numune üzerinde meydana gelebilecek düşey yöndeki deformasyonları (akma) bulmak için yapılmaktadır. Kalıp içerisinde sıkıştırılmış ve kalıptan çıkarılmış numunelerin yükseklik değerleri ölçülerek 60 ± 1 °C sıcaklıktaki su banyosu içerisine 40-60 dk bekletilir. Daha sonra sudan çıkarılan numune cihazın kırma çenesi içerisine yerleştirilir ve 50 ± 2 mm/dk hızla yükleme işlemi gerçekleştirilerek kırılır. Deney sonucunda, akma

ve stabilite değerleri kaydedilerek stabilite d¼zeltme katsayıları farklı y¼sekliklere sahip numuneler için eşitlik (2.6) yardımıyla hesaplanır [23].

$$c = 5.24 \times e^{(-0.0258xh)} \quad (2.6)$$

Akma için %20 ve stabilite için %15 sapma olan numuneler varsa iptal edilir ve yeni numuneler ¼zerinde deney tekraren yapılır [23]. Marshall stabilite ve akma cihazı Şekil 2.22'de g¼sterilmiřtir.

Deney sonucunda ayrıca, karışımın sertliğinin ve deformatsyona karşı direncinin bir g¼stergesi olan Marshall Katsayısı (MQ) değeri de hesaplanmaktadır. MQ, stabilite değerinin akma değerine b¼l¼nmesiyle bulunmaktadır [21].



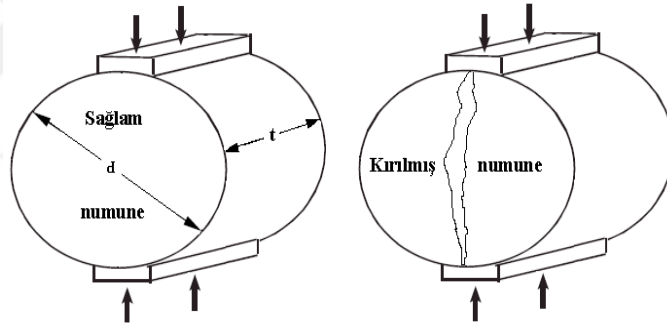
Şekil 2.22 : Marshall Stabilite ve Akma Cihazı.

2.6.2 Kalıcı marshall stabilitesi (RMS) deneyi

Karışım numunelerinin nem hasarına karşı dayanıklılıklarını belirlemek için kalıcı Marshall stabilitesi deneyi uygulanmaktadır. Deneyde biriket numuneleri 60 ± 1 °C sıcaklığındaki su banyosunda 24 saat s¼reyle k¼r edildikten sonra Marshall stabilite deneyine tabi tutulur. K¼r edilen biriket numunelerinin stabilite değerlerinin normal koşullardaki stabilite değerlerine oranı Kalıcı Marshall Stabilitesi (RMS) değerini vermektedir. Bu değerin y¼ksek olduğu karışımların nem hasarı sonuçlarının da y¼ksek olacağı ¼ng¼r¼lmektedir [24,25].

2.6.3 Dolaylı çekme mukavemeti (ITS) deneyi

Asfalt karışım numunelerinin kohezyon kuvvetini tespit etmek için kullanılan bu deney aynı zamanda karışımın orta sıcaklıklardaki durabilite ve sertliğini değerlendirmek için de kullanılır. Dolaylı çekme mukavemeti deneyi, yoğurmalı pres veya Marshall cihazı ile üretilmiş numunelere uygulanır. Karışımın kohezyon yeteneğini ifade eden ITS değerinin artmasıyla karışımın kohezyonu artmaktadır. Dolaylı çekme mukavemeti deneyi, karışım numunelerinin çekme mukavemetlerinin bulunmasında, aynı zamanda sıcaklık ve yorulma sebebiyle gerçekleşen çekme gerilmelerinin karakterizasyonunda da kullanılmaktadır. Bu deney, dolaylı çekme gerilmesi deney aletleri ve Marshall stabilite cihazı kullanılarak yapılır. Silindirik şeklindeki biriket numunesi düzleme paralel şekilde cihaza yerleştirilir ve 50,8 mm/dak hız ile sabit yük uygulanarak kırılır. Numune üzerine gelen en büyük yük kayıt altına alınır [1,11]. Numunenin deney başlangıcındaki ve sonrasındaki durumu Şekil 2.23’de gösterilmiştir.



Şekil 2.23 : ITS deneyi yükleme durumu ve kırılmış olan numune.

Deney sonucunda numunelerin dolaylı çekme mukavemeti değeri (2.7) bağıntısı ile hesaplanmaktadır [1].

$$ITS = [(2P_{\max} / \pi h d) \times 100] \quad (2.7)$$

Burada;

ITS : Dolaylı çekme mukavemeti (kPa),

Pmaks: Maximum yük (kN),

h: Numune yüksekliği (mm),

d: Numune çapı (mm)' nı ifade etmektedir.

2.6.4 Modifiye Lottman (Nem Hasarı) deneyi (AASHTO T-283)

Bu deney bitümlü sıcak karışım numunelerinin su tesirlerine karşı hassasiyetinin bulunması için yapılır. Böylelikle karışım içerisinde su tesirlerinden ötürü oluşan mukavemet azalışı tesbit edilir. Modifiye Lottman Deneyi sonucunda bulunan parametreler ile sıcak karışımların soyulmaya karşı dirençlerinin ve uzun dönem hizmet sürelerinin belirlenmesinde kullanılır [1].

Hazırlanan numunelerin dayanım kaybı belirlenirken, numuneler kuru (şartlandırılmamış) ve yaş (şartlandırılmış) olmak üzere iki gruba ayrılır. Karışımın dolaylı çekme mukavemetinin alınmasının nedeni, sıcak karışım aşınma tabakalarının sürekliliği için en önemli parametrenin çekme dayanımı olmasıdır. Yapılan bu deneyde çekme dayanımının az olması durumunda kaplama tabakası, çevre ve trafik etkenleri ile oluşabilecek çekme gerilmelerine maruz kalacak ve tabakada bozulmalar oluşacaktır [26].

Deneyde her seriden 3'er adet kuru ve yaş olmak üzere toplam en az 6 numune hazırlanır. Hazırlanan numuneler oda koşullarında 2 saat bekletilerek soğuma işlemi yapıldıktan sonra 60 °C etüvde 16 saat boyunca bekletilir. Numuneler sıkıştırma ısısında 2 saat süreyle beklemeye bırakıldıktan sonra %6-8 hava boşluğu olacak şekilde sıkıştırılır ve 24 saat oda koşullarında bekletilir. Şartlandırma yapılmayan kuru numuneler, 25 °C'deki su banyosunda ortalama 2 saat bekletildikten sonra dolaylı çekme deneyine tabi tutulur. Şartlandırılmış numuneler ise 13-67 kPa emme basıncı ile 5-10 dakika süre vakum uygulanarak %70-80 suya doymun hale getirilir. Doymun hale gelen numuneler -18 °C dondurucu içerisine koyularak 16 saat süre ile bekletilir. Daha sonra dondurucudan çıkarılan numuneler 60 °C sıcaklıktaki su havuzunda 24 saat boyunca bekletilmektedir. Çıkarılan numuneler 25 °C'deki su havuzunda 2 saat boyunca bekletilerek dolaylı çekme deneyi tatbik edilir. Şartlandırılmış numunelerin dolaylı çekme mukavemetinin ($ITS_{yaş}$), şartlandırılmayan (kuru) numunelerin dolaylı çekme mukavemetine (ITS_{kuru}) oranı (2.8) bağıntısı ile hesaplanmaktadır [3,27,28].

$$ITSR = (ITS_{yaş}/ITS_{kuru}) \times 100 \quad (2.8)$$

Burada;

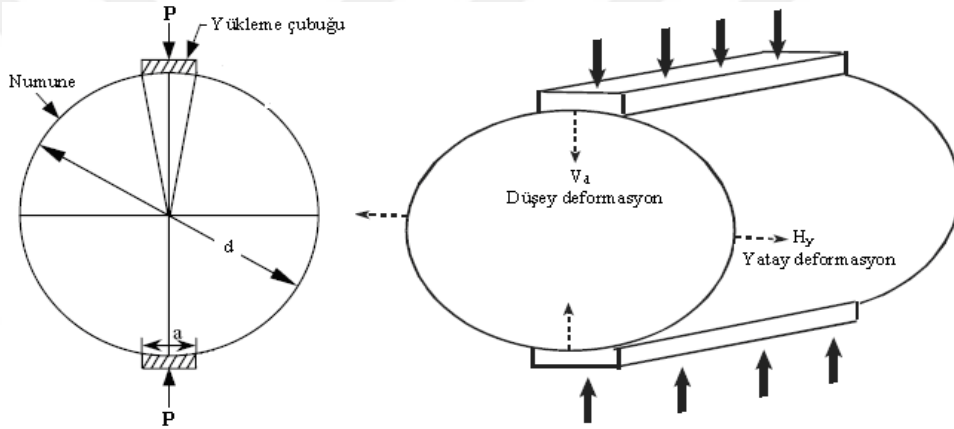
ITSR : Dolaylı çekme mukavemeti oranı (%),

$ITS_{yaş}$: Şartlandırılmış (yaş) numunelerin ortalama dolaylı çekme mukavemeti (kPa),

ITS_{kuru} : Şartlandırılmamış (kuru) numunelerin ortalama dolaylı çekme mukavemeti (kPa)

2.6.5 Dolaylı çekme esneklik modülü deneyi (ITSM)

BSK numunelerinin dinamik yüklere maruz kaldığı andaki esnekliğini belirlemek için yapılan bu deneyde; belirlenen esneklik modülü, kaplamanın performansını ve yükü dağıtma yeteneğinin belirlenmesinde önemli bir parametredir. Esneklik modülü, maksimum gerilmenin maksimum birim şekil değiştirmeye oranıdır ve tek eksenli yükleme altında yapılır. Dolaylı çekme esneklik modülü deneyinde, numune üzerine sünizoidal olarak düşey yönde bir basınç yükü tekrar eden darbeler halinde uygulanmaktadır. Deney sonucunda, farklı ısı ve yükleme şartları altında numunelere ait esneklik modülü belirlenir [4]. Şekil 2.24’de ITSM deneyinin şematik görünüşü verilmiştir.



Şekil 2.24 : ITSM deneyi ve şematik olarak görünüş.

Deney sonucunda, numunelere tatbik edilen dinamik yük ve toplam deformasyon ölçülerek kaydedilir ve numunenin esneklik modülü bağıntı (2.9) yardımıyla hesaplanır [1,8].

$$Em = \frac{P*(v+0.2734)}{Hy*h} \quad (2.9)$$

Burada;

Em: Esneklik modülü (Mpa),

P : Maksimum yük (N),

Hy: Toplam yatay deformasyon (mm),

h : Numune kalınlığı (mm),

v : Poisson oranını ifade etmektedir.

Esneklik modülünü yükleme hızı, sıcaklık ve numunenin hava boşluğu etkilemektedir. Bununla birlikte yüksek yükleme hızı ve düşük sıcaklık esneklik modülünü arttırmaktadır [1]. Şekil 2.25’de ITSM deney düzeneği gösterilmiştir.



Şekil 2.25 : ITSM deney düzeneği.

2.6.6 Sünme deneyi

Sünme deneyi, dinamik ve statik olmak üzere iki farklı yükleme altında yapılmaktadır. Dinamik sünme deneyi BSK numunelerinin dinamik yükleme altındaki mukavemetini bulmak amacıyla yapılmaktadır. Deneyde numunelere yük uygulanarak oluşabilecek deformasyon ölçülmektedir [21]. Deneyin tatbik edilme ısı genellikle 40 °C olmasına rağmen daha sıcak bölgeler için daha yüksek sıcaklıklarda yapılabilmektedir [1,28]. Yük tekrür oranına bağlı olarak meydana gelen deformasyonların oluştuğu deneyde, numuneler bozuluncaya kadar yüklemeler devam etmektedir. Dinamik sünme deneyi sonucunda oluşan sünme değeri, kaplama sertliği ve tekerlek izi hesabında kullanılmaktadır [8]. Statik sünme deneyi ise statik yüklemeler altındaki dayanımın bulunması maksadıyla yapılmaktadır. BSK numunesi üzerine yük uygulanıp daha sonra kaldırılarak oluşan kalıcı deformasyon değeri kaydedilir. Bu deney sonucunda bulunan sünme modülü değeri, ısı ve dingil yüklerine maruz kalan karışımların tekerlek izi ve düşük sıcaklıktaki sertlik hesabında kullanılmaktadır [1]. Deney uygulanırken 1 saat süresince aksenal gerilme (σ) uygulanır ve zamanın bir fonksiyonu olarak aksenal deformasyonlar ölçülür. Sünme modülü (E_{cq}) değeri (2.11)’deki gibi hesaplanır.

$$E_{cq}(t) = \sigma / \Sigma_c (t) \quad (2.11)$$

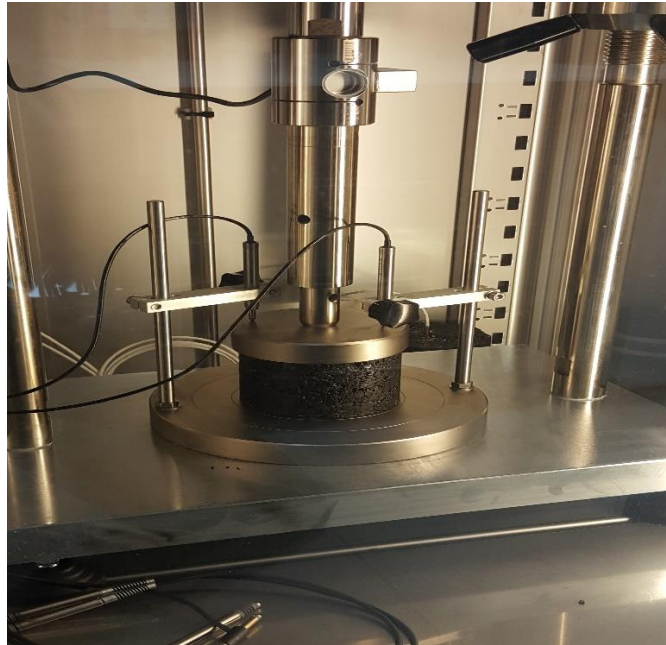
Burada;

$E_{cq} (t)$: t anındaki sünme modülü (MPa),

σ : Uygulanan gerilme (Mpa),

$\Sigma_c (t)$: t anında oluşan toplam kalıcı deformasyonunu (mm/mm) ifade etmektedir.

Statik sünme deneyi şekil 2.26’da görüldüğü gibi deney düzeneği kullanılarak yapılmaktadır. Deneye başlamadan önce numuneler, deney sıcaklığında en az 3 saat boyunca şartlandırılır. Sonrasında numuneler yükleme plakası ile alt tabla arasına yerleştirilerek düşey deformasyonu ölçecek sensörler plakanın sağına ve soluna yerleştirilerek ayarlanır. Gerekli olan deney verileri programa girildikten sonra cihaz kabini içindeki referans numunesinin içerisinde ve yüzeyinde bulunan sıcaklık ölçen sensörlerin aynı sıcaklık değerini gösterdiği anda deneye başlanır. Numunelere ilk 10 dk. boyunca 10 kPa’lık ön yükleme yapılır. Ön yüklemekten sonra 60 dk boyunca 100 kPa’lık yükleme yapılır. Deney bitiminden sonra birim deformasyon- zaman, rijitlik modülü- zaman grafikleri otomatik olarak elde edilir [1]. Sünme deneyi uygulanan numune Şekil 2.26’da gösterilmiştir.



Şekil 2.26 : Sünme deneyi uygulanan numune.

3. ATIK SİYAH KARBON İLE BİTÜM MODİFİKASYONU

Esnek kaplamaların farklı trafik ve çevre etkileri altında performans bakımından nitelikli, bakım maliyetinin az ve uzun ömürlü olması amaçlanmaktadır. Bu özelliklere sahip bir kaplamanın üretilmesi için yorulma ve düşük sıcaklık bozulmalarının, kalıcı şekil değiştirmelerinin, düşük durabilitelerinin ve su etkisinde soyulmalarının minimum seviyeye getirilmesi gerekir. Klasik asfalt bağlayıcılar ile üretilen BSK kaplamalarda bu genellikle çok mümkün olmamaktadır. Bu sebeple günümüzde asfalt veya asfalt karışımlara çeşitli katkıları ilave edilerek kaplama performansının en iyi seviyeye çıkarılmasına çalışılmaktadır [4].

Kaplama performansını geliştirmek amacıyla çeşitli atık veya ticari katkıların asfalt veya sıcak karışıma belirli oranlarda ilave edilmesine modifikasyon işlemi denilmektedir. Bu şekilde elde edilen asfalt “Modifiye Asfalt”, karışım ise “Modifiye Karışım” olarak isimlendirilmektedir [7].

Asfalt ve asfalt karışımların genel olarak modifiye edilmelerinin amaçları aşağıdaki şekilde sıralanabilir [1]:

- 1- Kayma direnci yüksek kaplama yüzeyi elde etmek,
- 2- Yüksek servis sıcaklıklarında rijit karışımlar elde ederek tekerlek izi oluşumunu en aza indirmek,
- 3- Düşük sıcaklıklarda daha esnek karışımlar elde ederek termal çatlak oluşumunu minimuma indirmek,
- 4- Oluşturulan karışımın dayanımını, direncini ve işlenebilirliğini arttırmak.

Günümüz şartlarında modifiye asfalt veya modifiye karışım elde ederek bunların farklı özelliklerini iyileştirmek için kullanılan ticari ve atık birçok katkı maddesi bulunmaktadır. Yaygın bir şekilde kullanılan katkı maddeleri ve kullanım amaçları Çizelge 3.1’de gösterilmiştir [5,7].

Çizelge 3.1 : Modifiyer Maddeleri [7].

Katkı Tipi	Amaç
Siyah Karbon	Asfaltın dayanımını ve karışımın deformasyon direncini artırmak
Katran	Aşınma direncini ve yakıt hasarlarına karşı direncini artırmak
Doğal Asfaltlar	Isıya duyarlılığını düzeltmek, aşınma direncini artırmak
SBS	Penetrasyon, yumuşama noktası, düşük ısı çatlakları, elastikiyet vb. özellikleri iyileştirmek
Termoseting Polimerler	Kalıcı deformasyon direncini ve adezyonu artırmak
Organo-Manganez Bileşikleri	Mukavemeti artırmak, karışımın ısıya duyarlılığını ve fiziksel özelliklerini iyileştirmek
Termoplastik Kauçuklar	Deformasyon direncini ve yorulma mukavemetini iyileştirmek,
Epoksi Reçinesi	Deformasyon direncini ve yakıt hasarlarına karşı direncini artırmak
Termoplastik Polimerler	Deformasyon direncini ve işlenebilirliği iyileştirmek, viskosluğu artırmak
Gilsonit (Tabii Asfalt)	Teker izi deformasyon direncini artırmak
Sülfür	İşlenebilirliği, deformasyon direncini ve stabilitesini artırmak
Yağ	Bağlayıcılığı artırmak penetrasyon ve yumuşama noktasını düşürmek,viskositeyi düşürmek
Filler	Rijitliği artırmak, yumuşama noktasını artırmak
Elyaf lar	Çatlama direncini artırmak
APP ve EVA	Rijitlik, penetrasyon, frass kırılma, yumuşama noktası vb. özelliklerini iyileştirmek
Çözücüler	Viskoziteyi artırmak

Günümüzde, dünya genelinde en önemli sorunların başında geri dönüştürülmemiş atık malzemelerin neden olduğu çevresel sorunlar gelmektedir. Bu atık malzemelerde örnek olarak atık araç lastikleri, plastik atıklar, inşaat moloz atıkları, gıda atıkları ve atık cam malzemeleri gelmektedir. Çözüm olarak bu atıkların geri dönüştürülerek yeniden

kullanımları geleceğimiz için önemli bir duruma gelmiştir. Ayrıca doğal kaynakların sürdürülebilmesi ile birlikte ekonomik kayıpların da önüne geçilmesi sağlanmaktadır. Düzensiz depolandıklarında yüksek hacimsel boşluklar sebebiyle büyük depolama alanlarına ihtiyaç duyan hurda lastikler de atık bir malzeme olarak karşımıza çıkmaktadır. LASDER'in verilerine göre her yıl Ülkemizde yaklaşık 300000 ton atık lastik oluşmaktadır. Yenileme pazarına lastik satan her üretici/ithalatçı, o yılı takip eden sene piyasaya sattığı miktarın, seneler bazında artan bir oranını toplayarak geri kazandırmak zorundadır. Türkiye'de %30 ile başlayan kota yükümlülüğü bu gün itibarıyla %80'e ulaşmıştır. Bu hurda lastiklerin inşaat sektöründe birçok alanda kullanıldığı bilinmektedir. Hurda lastikler parçalanmak suretiyle granüler halde ya da pirolize tabi tutularak iki farklı şekilde geri dönüşümde kullanılabilir [2].

3.1 Piroliz yöntemi ile siyah karbon (SK) üretimi

Kullanım ömrü sonlanmış lastiklerin geri kazanımında kullanılan piroliz yöntemi son yıllarda ilgi duyulan bir alan olarak göze çarpmaktadır. Piroliz, oksijenin bulunmadığı bir ortamda organik maddenin yüksek sıcaklıklarda (500 – 1000 °C) ısıtılması sonucu termal olarak bozunması işlemidir. Piroliz işlemi sonucunda elde edilen siyah karbon ve lastik içerisinde bulunan çelik tel karışımı, mıknatıs yoluyla ayrıştırılarak siyah karbon elde edilir. Öğütme işlemi sonucunda 30-40 µ boyuta getirilen ürün olan 'Piroliz Siyah Karbon' (CBp) torbalanarak kullanıma hazır hale getirilir [29].

Atık lastiklerin piroliz işlemiyle geri kazanılması sonucu yanmış gaz ürün, piroliz yağı, hurda çelik ve siyah karbon açığa çıkmaktadır. Bir otomobil lastiğinde %47 kauçuk, %21,5 siyah karbon, %16,5 metal, %5,5 tekstil, %1 çinko oksit, %1 kükürt ve %7,5 katkı malzemeleri bulunmaktadır. Birçok sanayi alanında kullanılan siyah karbon kullanım oranına ve yapısına bağlı olarak kauçuk esaslı maddelerin dayanıklılığını ve rengini geliştirmekte olup kullanım performansını arttırmaktadır [30].

Siyah karbon kullanılarak plastik, yangın söndürme aletleri, oto yedek parçaları, kablo, hortum, konveyör bant, ısı yalıtım malzemesi, kauçuk boya maddesi ve paspas olmak üzere çeşitli sanayi ürünleri üretilebilir [2]. Atık lastiklerden piroliz işlemi sonucu açığa çıkan siyah karbon Şekil 3.1' de görülmektedir.



Şekil 3.1 : Siyah Karbon.

3.2 Literatür çalışmaları

Siyah karbon çeşitli sanayi alanlarında kullanılan bir malzemedir. Atık araç lastiklerinin çevreye olan zararının en aza indirgenmesi ve ülke ekonomisi açısından geri dönüşüm yoluyla tekrar kullanılması oldukça önemlidir.

Ahmedzade vd. (2008), yaptıkları çalışmada siyah karbonun asfalt betonunda filler olarak kullanımını araştırmışlardır. Çalışma sonucunda, siyah karbonun asfalt betonu karışımlarının Marshall stabilite, indirekt çekme rijitlik modülü ve sünme sertliğini arttırdığı görülmüştür [32].

Gürer ve Elmacı (2019), çalışmalarında siyah karbon katkılı bitümlü bağlayıcıların taş mastik asfalt karışımlarda elektriksel iletkenlik özellikleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Çalışmalarında %14 siyah karbon katkılı bitüm kullanılarak aynı gradasyon ve iletken madde içeriğine sahip taş mastik asfalt numunelerinin iki kat iletken hale geldiği görülmüştür [33].

Alataş vd. (2018), çalışmalarında öğütülmüş araç lastiklerinin piroliz işleminden sonra oluşan siyah karbonun ve öğütülmüş araç lastiğinin bitümlü bağlayıcıların reolojik özellikleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Bu amaçla, üç farklı oranda (%5, 10 ve 15) katkı malzemelerini modifiyer olarak bağlayıcıya eklemiştir. Fiziksel deney sonuçlarına göre, öğütülmüş araç lastiği ve siyah karbonun bitümün sertliğini attırdığı görülmüştür. Reolojik deney sonuçlarına göre, öğütülmüş araç lastiği katkısının modifiye bağlayıcıların tekerlek izi dayanımını ve elastikiyetini arttırdığı görülmüştür. Ancak öğütülmüş araç lastiğinin piroliz işlemi sonucunda elde edilen siyah karbonun

modifiye bağlayıcılarda kullanılmasının reolojik özellikleri üzerinde etkisi olmadığı görülmüştür [34].

Casado-Barrasa vd. (2019), sürdürülebilir asfalt betonlarında siyah karbon ve stiren-bütadien-stiren (SBS) katkılılarının etkilerini araştırmışlardır. Çalışmanın sonucunda, siyah karbon katkıli karışımların sertliğinde artışlar meydana geldiği ve siyah karbon katkısı ile karışımların suya karşı hassasiyetinin ve kohezyonunun arttığı görülmüştür [35].

Wang vd. (2020), çalışmalarında karbon esaslı nano malzemelerin asfalt bağlayıcıların depolama stabilitesi, termodinamik ve mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Çalışmanın sonucunda, karbon nano malzemelerin depolama stabiliteilerinin kararlılığa ulaştığı ve modifiye bağlayıcıların termal stabilitesini arttığı görülmüştür. Ayrıca nano malzemelerin asfalt ile etkisini Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR) ile değerlendirilmiş ve elde edilen sonuçlarda modifiye bağlayıcıların asfalt ile hiçbir kimyasal reaksiyon meydana getirmediği görülmüştür [36].

Ameli vd. (2020), çalışmalarında polifosforik asit (PPA), karbon nano tüp (CNT) ve stiren-bütadien-kauçuk (SBR) içeren taş mastik asfalt karışımlarının nem hasarına karşı dayanımlarını araştırmışlardır. Çalışmada %0; %0,5; %1; %1,5 ve %2 oranlarında CNT, %0,5 PPA ve %2 SBR kullanmışlardır. Çalışmanın sonucunda %1,5 CNT oranına kadar karışımların dolaylı gerilme mukavemeti (ITS) ve çekme dayanımı oranı (TSR) değerlerinin arttığı, daha sonra katkı oranının artmasıyla bu değerlerin azaldığı görülmüştür [37].

Tanzadeh ve Shafabakhsh (2020), çalışmalarında gazlardan ve petrokimyasal atıklardan elde ettikleri geri dönüştürülmüş siyah karbon (CB) ve üretmiş oldukları nano siyah karbon (NCB) ile modifiye edilmiş bitümlerin fiziksel özelliklerini ve karışımların ise suya karşı hassasiyetinin yüzey serbest enerjisi ile modelleyerek araştırmışlardır. Çalışmada % 3, 5, 7 ve 10 CB ve % 1, 3, 5 ve 7 NCB kullanılarak modifiye bitümler elde edilmiş ve ilk olarak fiziksel özelliklerini belirlemiş ve katkı oranlarının artışıyla bağlayıcıların sertliği ve penetrasyon indeksi değerleri artış göstermiştir. Karışım deney sonuçlarına bakıldığında ise, %10 CB oranında yüzey serbest enerjisi %50'den, %7 NCB oranında %80'den fazla arttığı görülmüştür. Ayrıca NCB katkısının, CB katkısına göre bitüme yapışmasının daha fazla olduğu görülmüştür [38].

Feng vd. (2016), çalışmalarında atık lastiklerden piroliz işlemi sonucu elde edilen siyah karbonun (PCB) bitümün performans özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Bu

amaçla çalışmada iki farklı boyutta (PCB₁- 15 µm; PCB₂- 150 µm) PCB kullanmışlardır. Elde edilen sonuçlarda, her iki boyuttaki siyah karbonun da bağlayıcının kalıcı deformasyon direncini artırdığı, ancak PCB₂'nin PCB₁'e göre nispeten bitüm performansı üzerinde daha etkili olduğu sonucuna varılmıştır [39].

Chaala vd. (1996), çalışmalarında pirolitik siyah karbon ile modifiye edilmiş bitümün reolojik özelliklerini araştırmışlardır. Bu amaçla, %5, 10, 15, 20 ve 30 oranlarında siyah karbonu bitüm modifikasyonunda kullanmışlardır. Çalışma sonucunda,

%5 ila %30 oranında siyah karbonun bitümlü bağlayıcıların reolojik özelliklerini olumlu yönde etkilediği görülmüştür [40].

Jahanbakhsh vd. (2018), çalışmalarında mikrodalga radyasyonu altında siyah karbonun modifiye asfalt betonunun indüksiyonla ısıtılması ve iyileştirilmesini araştırmışlardır. Çalışma sonucunda siyah karbon katkısının asfalt betonunun mekanik ve elektromanyetik özelliklerini artırdığı görülmüştür [41].

Cong vd. (2014), çalışmalarında siyah karbon-stiren bütadien stiren (SBS)-asfalt kompozitlerinin yaşlanma reolojik ve iletkenlik özelliklerine etkilerini araştırmışlardır. Çalışma sonucunda, yüksek oranlarda kullanılan siyah karbonun sıcaklık duyarlılığını arttırdığı, ancak genel olarak siyah karbonun asfaltın yaşlanma, reolojik ve elektrik iletkenliğini iyileştirdiği görülmüştür [42].

Satoda (2016), çalışmasında sürekli kuru damıtma sistemi ile hurda kauçuğu kullanarak ürettiği siyah karbonu kullanarak asfalt kaplama üretimi gerçekleştirmiştir. Çalışmada asfalt kaplama için yakıt gerektirmeyen sürekli bir kuru damıtma fırını geliştirmiştir. Buradan geri dönüştürülmüş siyah karbonun şehir içerisindeki yollarda doğal koşullar altında bölgesel olarak serim işlemini yapmıştır. Yapılan bu deneme yolunda 10 yılı aşkın süredir yağmur altında bile stabilitesinin değişmediği gözlenmiştir. Şehir merkezlerindeki trafik gürültüsünün engellendiği saptanmış olup sert ve nispeten düşük maliyetli, iyi görünümlü asfalt kaplama imal edilmiştir [43].

Lesueur vd. (1995), çalışmalarında atık lastik parçalarından piroliz yoluyla elde edilen siyah karbonu bitüm modifikasyonunda kullanmış ve bunun sonucu olarak siyah karbonlu karışımların düşük sıcaklıklarda iyi performans gösterdiğini belirtmişlerdir [44].

Chebil ve arkadaşları (2000), çalışmalarında siyah karbon ve odundan pirolitik yoluyla elde ettikleri mangal kömürünün bağlayıcılarda yüksek sıcaklıklardaki viskoelastik özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Çalışmada, mangal kömürü modifiyeli bağlayıcıların siyah karbon modifiyeli bağlayıcılardan sıcaklık hassasiyetinin daha

düşük olduğunu gözlemlenmiştir. Ayrıca mangal kömürü modifiyeli bağlayıcılarda tekerlek izi direncinin de artış gösterdiği gözlenmiştir [45].

Button vd. (1996), çalışmalarında karbon esaslı olan atık fotokopi makinesi tonerlerini asfalt modifikasyonunda kullanmışlardır. Bu çalışmada bitüm ağırlığının %2-10 oranında toner ilave edildiğinde bağlayıcının sıcaklık hassasiyetinin azaldığı görülmüştür [46].

Terrel ve Rimstrington (1980), çalışmalarında siyah karbonun asfalt modifikasyonunda kullanımını araştırmışlar ve çalışmada siyah karbon olarak Mikrofil 8 kullanmışlardır. Asfalt karışımlara siyah karbon ilavesinin karışım stabilitesini, nem dayanımını arttırdığı ve çekme direncini geliştirdiğini belirtmişlerdir [47].

Jennings ve arkadaşları (1988), penetrasyon sınıfı AC 200/300 olan bitüme Mikrofil 8 ilave ederek hazırladıkları karışımların tekerlek izi ve enine çatlak oluşumuna karşı oluşan direncini arazi çalışmaları yaparak tayin etmişlerdir. Sonuç olarak , kontrol karışımlarına göre tekerlek izi derinliğinde 1/2 oranında, enine çatlaklarda 2/3 oranında azalmalar oluşunu belirtmişlerdir [48].

4. MALZEME VE DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada atık lastiklerden piroliz işlemi yoluyla elde edilen siyah karbon (SK)'nın bitüm ve bitümlü sıcak karışımların özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla, ilk olarak modifiye bitümlerin hazırlanması için saf bitümün ve siyah karbonun özellikleri, karışım tasarımı için de agreganın fiziksel özellikleri tespit edilmiştir. Daha sonra saf bitüme ağırlıkça %5, %10, %15 ve %20 oranlarında siyah karbon eklenerek modifiye bitümler elde edilmiştir. Saf ve modifiye bitümlerin fiziksel özellikleri penetrasyon, yumuşama noktası ve düktülite gibi geleneksel testlerle, reolojik özellikleri ise dönel viskozimetre (RV), dinamik kayma reometresi (DSR) ve kiriş eğme reometresi (BBR) deneyleri ile tespit edilmiştir. Siyah karbonun BSK'ların performans özellikleri üzerindeki etkilerini belirlemek amacıyla saf ve modifiye bağlayıcılar kullanılarak, Marshall dizayn yöntemi ile karışım numuneleri hazırlanmıştır. Karışım numuneleri üzerinde Marshall stabilite ve akma, Kalıcı Marshall Stabilitesi (RMS), Dolaylı Çekme Mukavemeti (ITS), Dolaylı Çekme Esneklik Modülü (ITSM) ve sünme deneyleri uygulanmıştır.

4.1 Bitümlü bağlayıcı seçilmesi

Çalışmada kullanılan saf B 160/220 penetrasyon sınıfına sahip saf bitüm Elazığ Karayolları 8. Bölge Müdürlüğü asfalt şantiyesinden temin edilmiştir. Saf bitümün fiziksel özellikleri Çizelge 4.1'de verilmiştir.

Çizelge 4.1 : B 160/220 penetrasyon sınıflı saf bitümün fiziksel özellikleri.

Deney	Standart	B 160/220	
		Limitler	Sonuç
Penetrasyon (0,1mm)	EN 1426	160-220	175,2
Yumuşama noktası (°C)	EN 1427	35-43	42,45
Düktilite (cm)	TS 119	Min. 100	>100
Parlama noktası (°C)	EN 22719	Min. 230	242
Yanma noktası (°C)			254
Özgül ağırlık (gr/cm ³)	TS 1087	1,0 – 1,1	1,038
Kütle kaybı (%)	ASTM D2872	Maks.1	0,08

4.2 Agregas seçilmesi

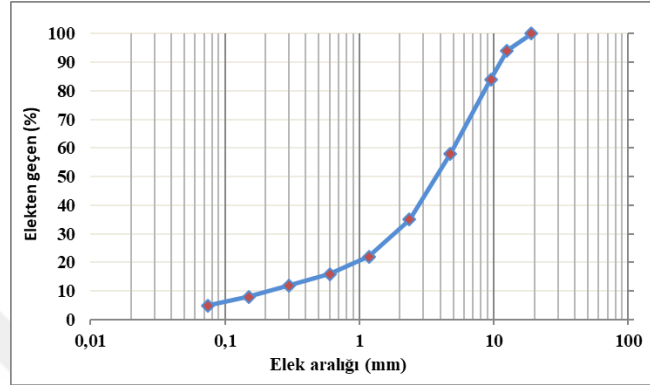
Çalışmada Elazığ Karayolları Bölge Müdürlüğünden temin edilen ve Malatya bölgesine ait kırmataş kalker agregası kullanılmıştır. Kullanılan agreganın fiziksel özellikleri Çizelge 4.2’de, agregas gradasyonu Çizelge 4.3’de, gradasyon eğrisi ise Şekil 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.2 : Agreganın fiziksel özellikleri.

Deney	Standart	Şartname Limiti	Değer
Kaba agregas zahiri özgül ağırlık (gr/cm ³)		-	2,70
Kaba agregas hacim özgül ağırlık (gr/cm ³)	ASTM C 127	-	2,67
Kaba agregas su emme yüzdesi		Maks.2	0,47
İnce agregas zahiri özgül ağırlık (gr/cm ³)		-	2,75
İnce agregas hacim özgül ağırlık (gr/cm ³)	ASTM C 128	-	2,63
İnce agregas su emme yüzdesi		Maks.2	1,66
Filler zahiri özgül ağırlık (gr/cm ³)	ASTM D 854	-	2,85
Aşınma Kaybı (Los Angeles) (%)	ASTM C131	Maks.30	27
Donma Kaybı (MgSO ₄) (%)	ASTM C88	Maks.10	5
Yassı ve uzun parçalar (%)	ASTM D4791	Maks.10	5

Çizelge 4.3 : Agrega gradasyonu.

Elek Boyutu (mm)	19	12,5	9,5	4,75	2,36	1,18	0,6	0,3	0,15	0,075
	3/4	1/2	3/8	#4	#8	#16	#30	#50	#100	#200
Geçen (%)	100	94	84	58	35	22	16	12	8	5



Şekil 4.1 : Agrega gradasyon eğrisi.

4.3 Katkı malzemesinin seçilmesi

Çalışmada bitüm modifikasyonunda kullanmak için Erzincan ERA Çevre Teknolojileri A.Ş'den temin edilen, atık lastiklerin piroliz işleminden geçirilmesiyle elde edilmiş olan siyah karbon (SK) kullanılmıştır. SK'nın özellikleri Çizelge 4.4'de, siyah karbonun element analizi sonuçları da Çizelge 4.5'da verilmiştir.

Çizelge 4.4 : SK'nın özellikleri.

Özellik	SK
Özgül ağırlık	1,7 – 1,9 gr/ml
Hacim özgül ağırlık	20-440 kg/m ³
Parlama noktası	Parlamaz
Renk	Siyah
Erime sıcaklığı	>3000 °C
pH	4-11
Görünüm	Toz, Pellet
Kütle kaybı (125 °C) (%)	0,5

Çizelge 4.5 : SK'nın element analizi.

Element	İçerik (%)
C	56,73
H	2,09
S	2,11
O	39,07

4.4 Modifiye bitümlerin hazırlanması

Çalışmada modifiye bitümler elde etmek amacıyla ilk olarak saf bitüm 150 °C sıcaklığa kadar ısıtılmıştır. Daha sonra bitüm ağırlığının %5, 10, 15 ve 20 oranlarında SK ilavesi edilmiş ve karıştırma işlemi 500 devirde 60 dakika boyunca aynı sıcaklıkta devam ettirilmiştir. Tüm modifiye bitümler aynı işlem sırasında hazırlanmıştır. Çalışmada kullanılan karıştırma cihazı ve modifiye bitümler Şekil 4.2'de verilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 4.2 : Karıştırma cihazı (a), modifiye bitümler (b).

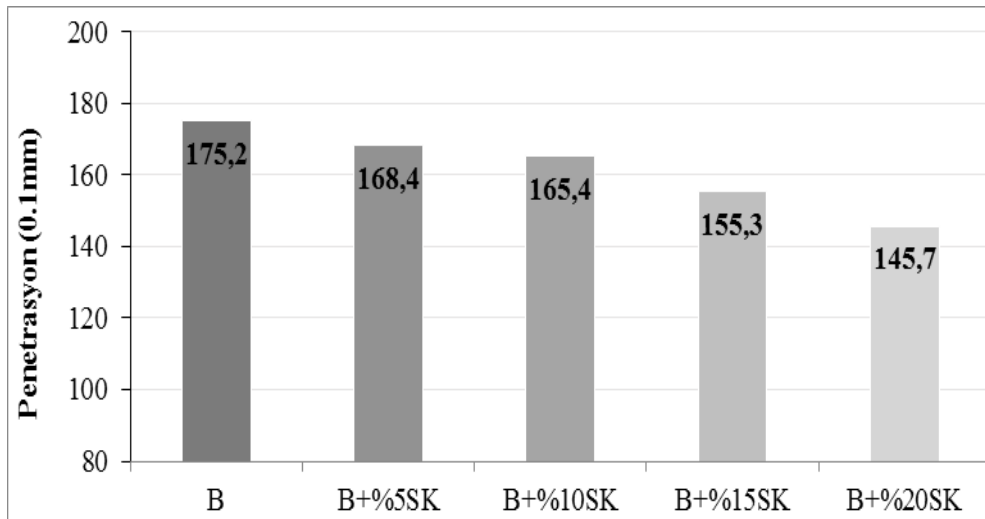
Çalışmada elde edilmiş olan saf ve modifiye bitümler sırasıyla B, B+%5SK, B+%10SK, B+%15SK ve B+%20SK olarak kodlanmıştır.

4.5 Modifiye bitümlerin fiziksel özelliklerinin belirlenmesi

Saf ve SK katkılı modifiye bitümlerin fiziksel özellikleri penetrasyon (TS EN 1426), yumuşama noktası (TS EN 1427) ve duktilite (TS EN 12589) gibi geleneksel testler ile belirlenmiştir. Bağlayıcıların elde edilen test sonuçları Çizelge 4.6’da, katkı oranına bağlı olarak penetrasyon, yumuşama noktası ve duktilite değerlerindeki değişimi ise sırasıyla Şekil 4.3, Şekil 4.4 ve Şekil 4.5’de verilmiştir.

Çizelge 4.6 : Bağlayıcıların geleneksel test sonuçları.

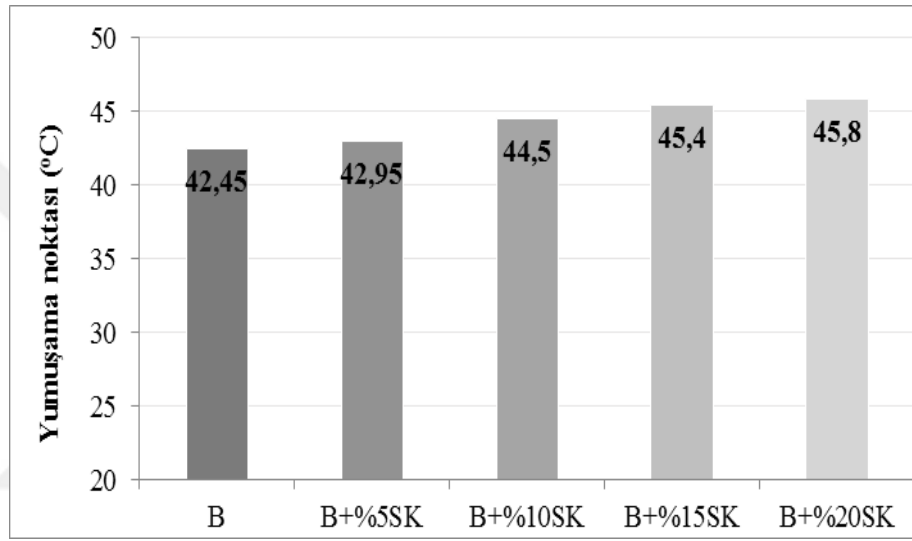
Bağlayıcı Türü	Penetrasyon (0.1 mm)	Yumuşama Noktası (°C)	Duktilite (cm)
B	175,2	42,45	130
B+%5SK	168,4	42,95	123
B+%10SK	165,4	44,5	121
B+%15SK	155,3	45,4	116
B+%20SK	145,7	45,8	111



Şekil 4.3 : Bağlayıcıların penetrasyon değişimleri.

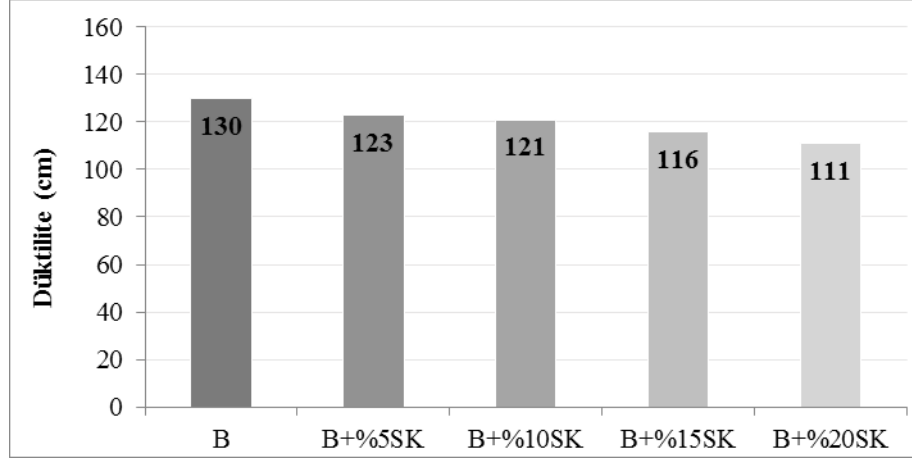
Şekil 4.3’de görüldüğü gibi B 160/220 penetrasyon sınıflı saf bitüme SK katkısının eklenmesiyle, penetrasyon değerlerinde düzenli bir azalma meydana gelmiştir. Saf bitüme göre bu azalma oranları sırasıyla %3,9; %5,6; 11,4 ve % 16,8 şeklindedir. Bu

durumda, SK ilavesi ile modifiye bitümlerin giderek sertleşmeye başladığını söylemek mümkündür. Ayrıca, penetrasyon değerindeki azalma sonucunda %20 SK katkıli modifiye bitümün B 100/150 penetrasyon sınıfına geçtiği ifade edilebilir. Sonuç olarak, soğuk iklimlerde kullanılan B 160/220 penetrasyon sınıflı saf bitümün %20 SK ilavesiyle sertleşerek nispeten daha ılık bölgelerde kullanılan B 100/150 penetrasyon sınıflı bitüme dönüştüğü ve bu durumda %20 SK katkıli modifiye bağlayıcının bitümden kaynaklı kalıcı deformasyonlara karşı daha elverişli olduğunu ifade etmek mümkündür.



Şekil 4.4 : Bağlayıcıların yumuşama noktası değişimleri.

Şekil 4.4'de görüldüğü gibi B 160/220 penetrasyon sınıflı saf bitümüne SK eklenmesiyle yumuşama noktası değerlerinde düzenli bir artış meydana gelmiştir. Meydana gelen bu artış oranları saf bitüme göre sırasıyla %1,2; %4,8; %5,5 %7,9 şeklindedir. En yüksek yumuşama noktası değeri %20 SK katkıli bağlayıcıda elde edilmiştir. Ayrıca yumuşama noktası deney sonuçlarının penetrasyon sonuçları ile uyumluluk gösterdiğini de ifade etmek mümkündür. Düşük penetrasyon ve yüksek yumuşama noktası değerine sahip olan %20 SK katkıli bağlayıcının nispeten daha ılıman bölgelerde kullanılabileceği söylenebilir.



Şekil 4.5 : Bağlayıcıların düktilite değişimleri.

Şekil 4.5’de görüldüğü gibi, SK ilavesiyle modifiye bitümlerin düktilite değerlerinde düzenli azalışlar meydana gelmiştir. Meydana gelen bu azalma oranları saf bitüme göre sırasıyla %5,4; %6,9; %10,8 ve %14,6 şeklindedir. Düktilite değerlerindeki azalma, bitümlü bağlayıcıların uzama kabiliyetinin ve kohezyon mukavemetinin azaldığı anlamına gelmektedir.

Çalışmada ayrıca saf ve SK katkılı bağlayıcıların ısıya karşı duyarlılığın bir ölçüsü olarak değerlendirilen penetrasyon indeksi (PI) değerleri de denklem (4.1) ve (4.2) yardımıyla hesaplanmıştır [31].

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

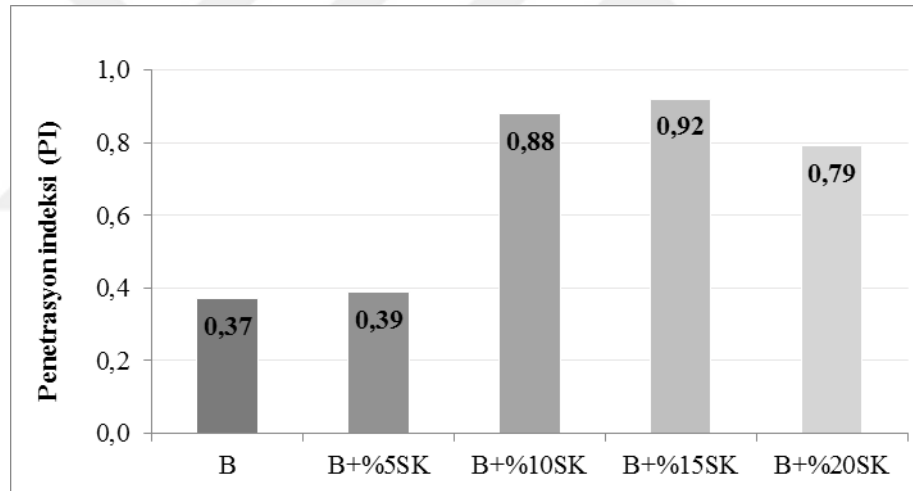
$$PI = \frac{20 - 500A}{1 + 50A} \quad (4.2)$$

Denklemdaki P_{25} , bitümün 25°C sıcaklıktaki penetrasyon değerini, T_{YN} ise yumuşama noktası değerini belirtmektedir. PI değerinin -2’den küçük olması bitümün ısıya çok duyarlı olduğunu, +2’den büyük olması ise ısıya karşı az duyarlı olduğunu ifade etmektedir [31]. Saf ve modifiye bağlayıcıların hesaplanan PI değerleri Çizelge 4.7’de verilmiştir.

Çizelge 4.7 : Bağlayıcıların PI değerleri.

Bağlayıcı Türü	Penetrasyon İndeksi (PI)
B	0,37
B+%5 SK	0,39
B+%10 SK	0,88
B+%15 SK	0,92
B+%20 SK	0,79

Çizelge 4.7’de görüldüğü gibi B 160/220 penetrasyon sınıflı saf bitüme SK eklenmesiyle, PI değerlerinde önemli değişimler meydana gelmiştir. Bu değişimler sırasıyla 0,37; 0,39; 0,88; 0,92 ve 0,79 şeklindedir. SK ilavesiyle bağlayıcıların PI değerlerindeki değişim Şekil 4.6’da verilmiştir.



Şekil 4.6 : PI değerinin katkı oranı ile değişimi.

Şekil 4.6 incelendiğinde, SK katkı oranının artmasıyla bağlayıcıların PI değerleri saf bitüme göre genel olarak artış göstermiştir. PI değerinin artış göstermesi, SK katkılı bağlayıcıların sıcaklık hassasiyetinin azaldığını göstermektedir. Bu durumda, sıcaklık hassasiyeti bakımından en uygun katkı oranının %15SK olduğunu söylemek mümkündür.

4.6 Bağlayıcıların yaşlandırılması

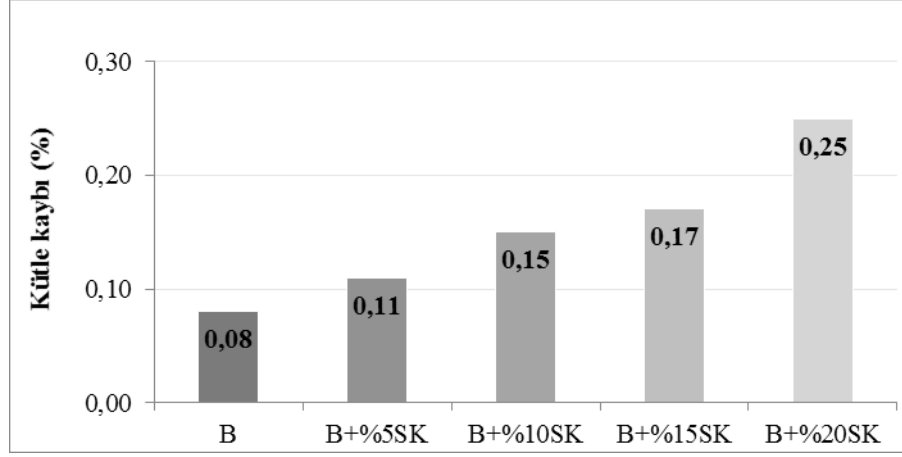
Saf ve SK modifiyeli bağlayıcıların yaşlanmaya karşı direncini ve bünyelerindeki uçucu madde kaybını tayin etmek amacıyla, bağlayıcılar ilk olarak dönel ince film etüvü deneyi (RTFOT) ile kısa süreli yaşlandırmaya tabi tutulmuştur. RTFOT sonrası tüm bağlayıcılar üzerinde penetrasyon ve yumuşama noktası deneyleri yapılmıştır.

Bu amaçla saf ve SK katkılı bağlayıcılar ilk olarak 150 °C sıcaklıkta ısıtılmıştır. Daha sonra 8 adet şişenin her birinin içerisine yaklaşık 35±0,5 gr. doldurularak 163 °C sıcaklığa ulaşmış olan RTFOT cihazının içindeki dönel tabla bölmelerine yerleştirilmiş ve dakikada 15 devir yaparak 75 dakika süreyle deneye maruz bırakılmıştır. Deney sonucunda kütle kayıplarının hesabı için, önceden darası alınmış ve tartılmış olan 2 şişe, yaşlandırma işleminden sonra tartılarak kütle kayıpları hesaplanmıştır. Geriye kalan 6 şişe ise diğer performans deneylerinde kullanılmak üzere başka kaplara alınarak muhafaza edilmiştir.

Saf ve SK katkılı bağlayıcıların kütle kayıpları Çizelge 4.8'de, bağlayıcıların kütle kayıplarındaki değişim ise Şekil 4.7'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.8 : Bağlayıcıların kütle kayıpları.

Bağlayıcı Türü	M1, İlk Kütle (gr)	M2, Son Kütle (gr)	Kütle Kaybı (%)	Ortalama Kütle Kaybı (%)
B	185,85	185,72	0,07	0,08
	188,7	188,54	0,08	
B+%5SK	194,66	194,45	0,11	0,11
	189,16	188,95	0,11	
B+%10SK	190,71	190,45	0,14	0,15
	189,96	189,65	0,16	
B+%15SK	205,45	205,11	0,17	0,17
	190,17	189,84	0,17	
B+%20SK	186,93	186,42	0,27	0,25
	201,67	201,22	0,22	



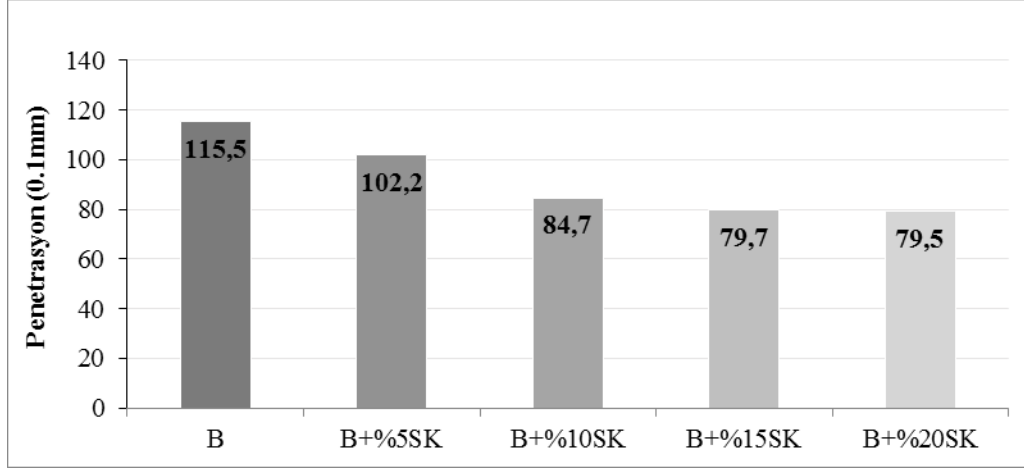
Şekil 4.7 : Bağlayıcıların kütle kayıplarındaki değişim.

Çizelge 4.8 ve Şekil 4.7’de görüldüğü gibi B 160/220 penetrasyon sınıfı saf bitüme SK eklenmesiyle kütle kaybında önemli değişimler meydana gelmiştir. En fazla kütle kaybı ise %20 SK katkılı bağlayıcıda meydana gelmiştir. KTŞ’ye göre en fazla kütle kaybı yüzdesinin %1,0 olması istenmektedir. SK ilavesiyle bağlayıcılardaki kütle kaybı düzenli artış gösterse de, elde edilen sonuçların şartname limitlerinin oldukça altında kaldığı görülmektedir. Bu sonuç, saf ve SK katkılı bağlayıcıların sıcaklık ve oksidasyona karşı oldukça dirençli olduğunu göstermektedir.

Çalışmada ayrıca bağlayıcılar, RTFOT sonrası penetrasyon ve yumuşama noktası deneylerine tabii tutulmuştur. Elde edilen deney sonuçları Çizelge 4.9’da, bağlayıcıların penetrasyon değerlerindeki değişim ise Şekil 4.8’de verilmiştir.

Çizelge 4.9 : RTFOT sonrası geleneksel test sonuçları.

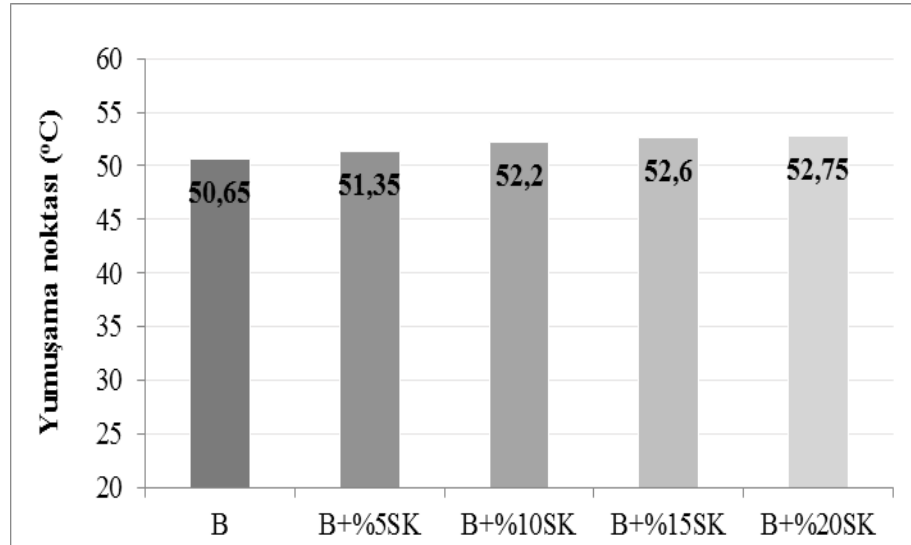
Bağlayıcı Türü	Penetrasyon (0.1 mm)	Yumuşama Noktası (°C)
B	115,5	50,65
B+%5 SK	102,2	51,35
B+%10 SK	84,7	52,2
B+%15 SK	79,7	52,6
B+%20 SK	79,5	52,8



Şekil 4.8 : RTFOT sonrası bağlayıcıların penetrasyon değişimleri.

Şekil 4.8’de görüldüğü gibi RTFOT sonrası tüm bağlayıcıların penetrasyon değerlerinde, büyük oranda azalmalar meydana gelmiştir. Ayrıca saf bitüme göre SK katkılı bağlayıcıların, RTFOT sonrası daha fazla sertleştiği görülmektedir. Bu durum, SK katkılı kaplamaların saf bitüm ile yapılmış olan kaplamalara göre, kalıcı deformasyonlara karşı daha dirençli olabileceğini göstermektedir.

RTFOT sonrası bağlayıcıların yumuşama noktası değerlerindeki değişim Şekil 4.9’da verilmiştir.



Şekil 4.9 : RTFOT sonrası bağlayıcıların yumuşama noktası değişimleri.

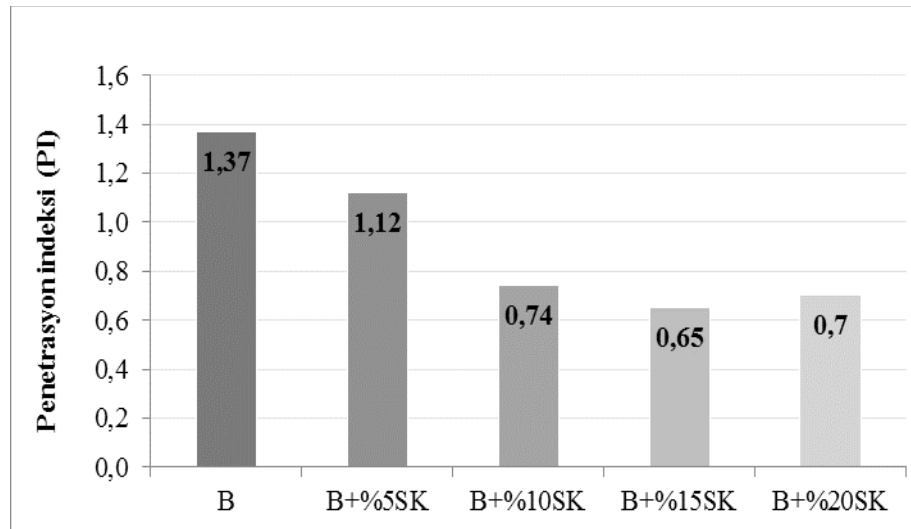
Şekil 4.9 incelendiğinde, RTFOT sonrası bağlayıcıların yumuşama noktası değerlerinde kısmi artış meydana gelmiştir.

Ayrıca saf bitüme göre SK katkılı bağlayıcıların, RTFOT sonrası daha fazla sertleştiği ve sonuçların penetrasyon değerleri ile de uyumlu olduğu görülmektedir. Bu durum, SK katkılı kaplamaların saf bitüm ile yapılmış olan kaplamalara göre, tekerlek izi oluşumlarına karşı daha dirençli olabileceğini göstermektedir.

Çalışmada ayrıca RTFOT sonrası bağlayıcıların penetrasyon indeksi (PI) değerleri de hesaplanmış olup sonuçlar Çizelge 4.10'da, katkı oranı ile PI değerlerinin değişimi ise Şekil 4.10'da verilmiştir.

Çizelge 4.10 : RTFOT sonrası bağlayıcıların PI değerleri.

Bağlayıcı Türü	PI
B	1,37
B+%5SK	1,12
B+%10SK	0,74
B+%15SK	0,65
B+%20SK	0,70



Şekil 4.10 : RTFOT sonrası bağlayıcıların PI değerleri.

Çizelge 4.10 ve Şekil 4.10'da görüldüğü gibi yaşlandırılmış bağlayıcılar üzerinde yapılan PI değerleri sırasıyla 1,37; 1,12; 0,74; 0,65 ve 0,70 olarak hesaplanmıştır. Bu değişimler değerlendirildiğinde, SK katkısıyla bağlayıcıların PI değerlerinin saf bitüme göre azaldığı, yani sıcaklık hassasiyetinin daha da arttığı ifade edilebilir.

4.7 Bağlayıcıların Performans Deneyleri

Saf ve SK katkılı modifiye bağlayıcıların düşük, orta ve yüksek sıcaklık performans özelliklerini tespit etmek için Superpave bağlayıcı şartnamesi kullanılarak bağlayıcılara dönel viskozimetre (RV), dinamik kayma reometresi (DSR) ve kiriş eğme reometresi (BBR) deneyleri uygulanmıştır. Bitümlü bağlayıcıların karıştırma-sıkıştırma sıcaklıklarını tespit etmek için yaşlandırılmamış saf ve SK modifiyeli bağlayıcılar üzerinde RV deneyi uygulanmıştır. Bağlayıcıların yüksek sıcaklıklardaki performans seviyelerini belirlemek amacıyla yaşlandırılmamış ve RTFOT ile yaşlandırılmış saf ve SK katkılı bağlayıcılar üzerinde DSR deneyi uygulanmıştır. Bitümlü bağlayıcıların orta ve düşük sıcaklıklardaki performans seviyelerini belirlemek amacıyla RTFOT ile yaşlandırılmış bağlayıcılar daha sonra PAV ile yaşlandırılarak sırasıyla DSR ve BBR deneylerine tabi tutulmuştur.

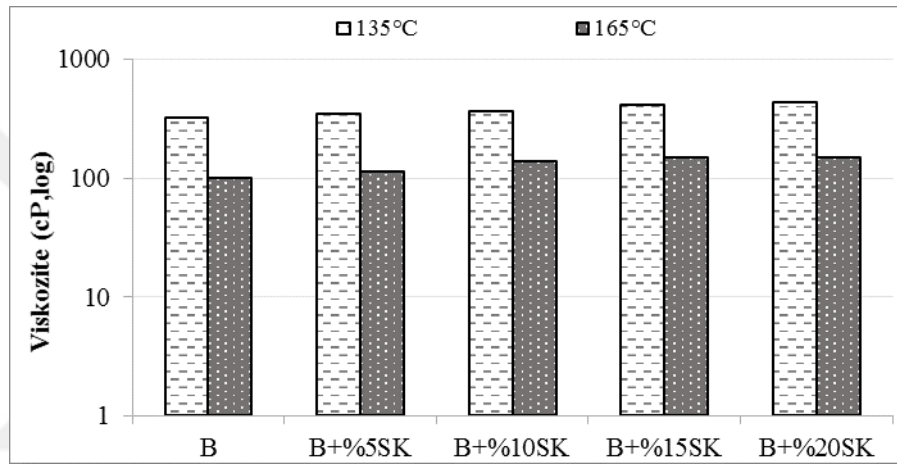
4.7.1 Dönel viskozimetre (RV) deneyi

Bitümlü bağlayıcıların plentteki karıştırma ve yoldaki sıkıştırma sıcaklıklarını tespit etmek amacıyla bağlayıcılar üzerinde RV deneyi yapılmaktadır. Bu çalışmada, RV deneyi Brookfield Viskozimetre Cihazı kullanılarak AASHTO TP48 standardına göre gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla saf ve SK katkılı bitümler, 135 °C ve 165 °C sıcaklıkta RV deneyine tabi tutulmuştur. Bu deneyde ilk olarak bağlayıcılar 150 °C de ısıtıldı ve yaklaşık 11 gr. kadar viskozite kabına doldurularak kap deney cihazına yerleştirildi. Belirlenen deney sıcaklığına gelen viskozimetre cihazı sıfırlandı ve 20 rpm. hızına ayarlı cihaza no:27 mili takılarak deney başlatıldı. Deney sırasında sabit sıcaklığa gelen bağlayıcıların viskozite değerleri cihaz tarafından otomatik olarak elde edildi.

Bağlayıcıların deney sonucunda elde edilen viskozite sonuçları Çizelge 4.11'de verilmiştir. Saf ve SK katkılı bağlayıcıların 135 °C ve 165 °C sıcaklıklardaki viskozite değerleri arasındaki ilişki ise Şekil 4.11'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.11 : Bağlayıcıların RV Sonuçları.

Bağlayıcı Türü	Viskozite (cP)	
	135 °C	165 °C
B	325	100
B+%5 SK	344	112,5
B+%10 SK	362,5	137,5
B+%15 SK	412,5	150
B+%20 SK	437,5	150

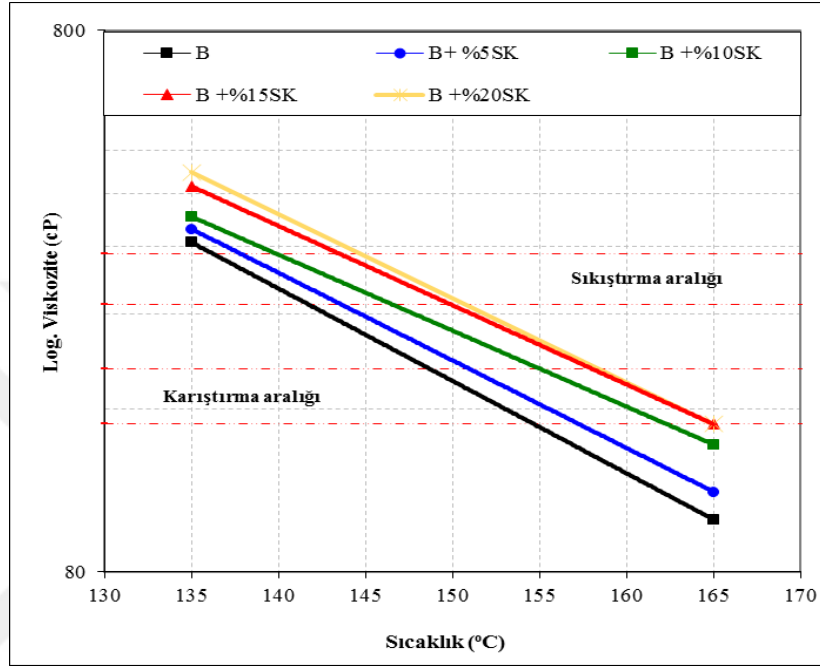


Şekil 4.11 : Bağlayıcıların 135 °C ve 165 °C sıcaklıklardaki viskozite değişimi.

Çizelge 4.11 ve Şekil 4.11’de görüldüğü gibi, viskozite değerleri SK katkı oranının artışıyla 135 °C ve 165°C sıcaklıklarda saf bitüme göre artış göstermiştir. Meydana gelen bu artışlar 135 °C sıcaklık için sırasıyla %5,8; %11,5; %26,9 ve 34,6; 165 °C sıcaklık için ise sırasıyla %12,5; %37,5; %50 ve %50 şeklindedir. Elde edilen bu sonuçlara göre SK katkılı bağlayıcıların işlenebilirlik özelliğinin saf bağlayıcıya göre azaldığını söylemek mümkündür.

BSK’ların hazırlanmasında bağlayıcıların agrega ile karıştırılırken ve yolda sıkıştırılırken belirli bir sıcaklık aralığında olması gerekmektedir. Sıcak karışımların karıştırılmasında 170 ± 20 cP, sıkıştırılmasında ise 280 ± 30 cP viskozite değerine sahip olması beklenmektedir [19]. Buradan elde edilen viskozite değerlerine karşılık gelen karıştırma ve sıkıştırma aralıklarını belirleyebilmek için 135 ve 165 °C sıcaklıkta yapılan viskozite deneyinden elde edilen viskozite değeri ile çizilen viskozite-sıcaklık grafiğinden yararlanılmaktadır.

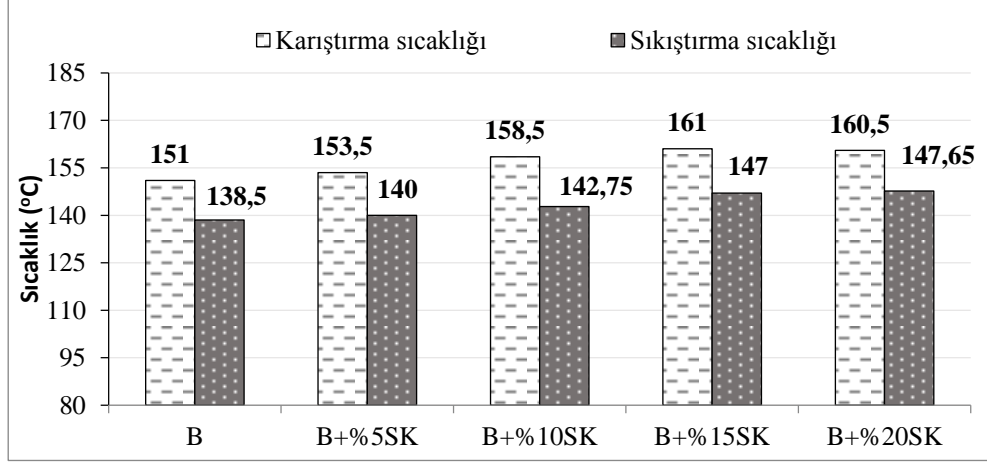
Saf ve SK katkıli bağlayıcıların karıştırma ve sıkıştırma sıcaklık aralıklarının belirlenebilmesi için elde edilen viskozite-sıcaklık grafikleri Şekil 4.12’de verilmiştir. Viskozite-sıcaklık grafiği vasıtasıyla elde edilen karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları Çizelge 4.12’de, bağlayıcıların ortalama karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları ise Şekil 4.13’de verilmiştir.



Şekil 4.12 : Bağlayıcıların viskozite-sıcaklık ilişkisi.

Çizelge 4.12 : Bağlayıcıların karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları.

Bağlayıcı Türü	Karıştırma aralığı (°C)	Sıkıştırma aralığı (°C)	Karıştırma sıcaklığı (°C)	Sıkıştırma sıcaklığı (°C)
B	148-154	136-141	151	138,5
B+%5 SK	151-156	137-143	153,5	140
B+%10 SK	155-162	140-145,5	158,5	142,75
B+%15 SK	157-165	144-150	161	147
B+%20 SK	157-164	144,8-150,5	160,5	147,65



Şekil 4.13 : Bağlayıcıların karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları.

Şekil 4.13 incelendiğinde, B 160/220 penetrasyon sınıflı saf bitümün karıştırma ve sıkıştırma sıcaklığı sırasıyla 151 °C ve 138,5 °C olarak belirlenmiştir. Saf bitüme artan oranlarda SK katkısının eklenmesiyle elde edilen modifiye bitümlerin karıştırma sıcaklıkları saf bitüme göre sırasıyla %1,7; %5; %6,6 ve %6,3 artış göstermiştir. Modifiye bitümlerin sıkıştırma sıcaklıklarında ise saf bitüme göre sırasıyla %1,1; %3,1; %6,1 ve %6,6 artış meydana gelmiştir. Elde edilen tüm bu sonuçlara göre, saf bitüme SK eklenmesiyle elde edilen modifiye bitümlerin kıvamının sertleşmesiyle beraber karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarının da arttığı ve bu sebeple SK katkılı bağlayıcıların saf bitüme göre plentteki karıştırma ve yoldaki sıkıştırma esnasında daha fazla enerji harcanabileceği söylenebilir.

4.7.2 Dinamik kesme reometresi (DSR) deneyi (AASHTO TP5)

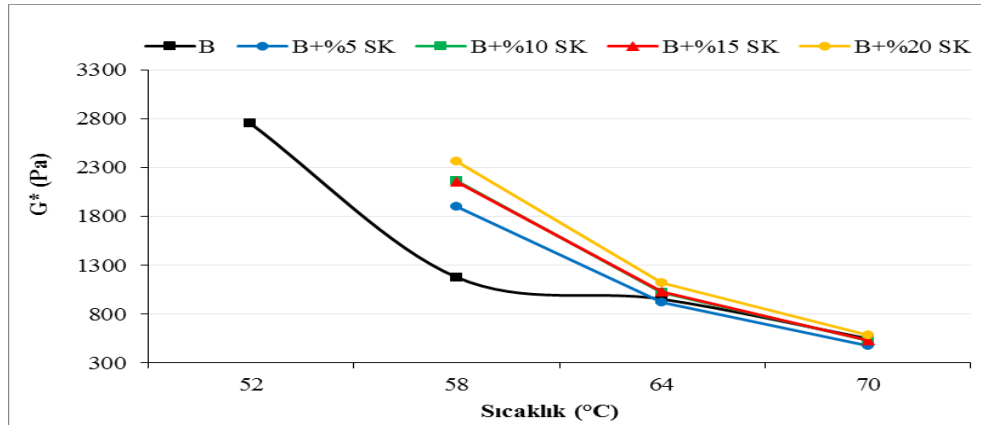
Bitümlü bağlayıcıların yüksek sıcaklıklar altında tekerlek izi ve orta sıcaklıklar altında yorulma çatlaklarına karşı göstereceği direnç DSR deneyi ile belirlenmektedir.

Bu çalışmada, orijinal (yaşlandırılmamış), RTFOT ile yaşlandırılmış ve PAV ile yaşlandırılmış bağlayıcılar üzerinde DSR deneyi uygulanmıştır. DSR deneyi, DSR deney cihazı kullanılarak AASHTO TP 70-09 standardına göre yapılmıştır. Deney, orijinal bağlayıcılar üzerinde 52°C, 58°C, 64°C ve 70°C sıcaklıklarda, RTFOT ile yaşlandırılmış bağlayıcılar üzerinde 58°C, 64°C ve 70°C sıcaklıklarda, PAV ile yaşlandırılmış bağlayıcılar üzerinde ise 16°C, 19°C ve 22°C sıcaklıklarda gerçekleştirilmiştir.

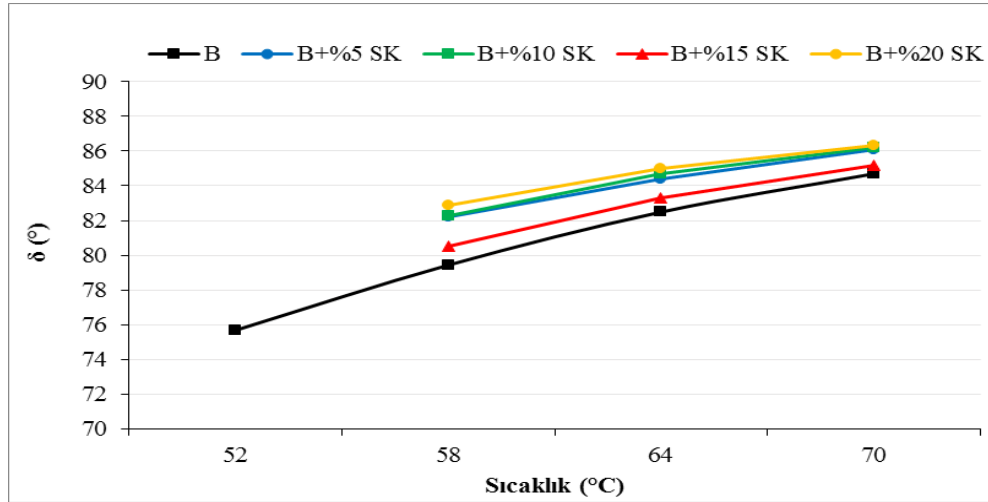
Orijinal saf ve SK katkılı bağlayıcıların yüksek sıcaklıklardaki DSR sonuçları Çizelge 4.14’de, bağlayıcıların kayma modülü (G^*) ve faz açısı (δ) değerlerinin sıcaklıkla değişimi sırasıyla Şekil 4.14 ve Şekil 4.15’de verilmiştir.

Çizelge 4.13 : Orijinal bağlayıcıların DSR sonuçları.

Bağlayıcı Türü	Sıcaklık (°C)	G^* (Pa)	δ (°)	$G^*/\sin \delta$ (Pa)	Şartname limitleri	Performans sınıfı
B	52	2750,5	75,7	2838,45	≥ 1000	PG 58-Y
	58	1175,2	79,45	1195,408		
	64	949,35	82,5	957,542		
	70	543,67	84,7	545,978		
B+%5 SK	58	1896,7	82,2	1914,23		PG 58-Y
	64	917,4	84,4	921,721		
	70	476,64	86,1	477,729		
B+%10 SK	58	2161,3	82,3	2180,91		PG 64-Y
	64	1015,6	84,7	1019,96		
	70	530,57	86,2	531,77		
B+%15 SK	58	2155,8	80,5	2185,59		PG 64-Y
	64	1031,7	83,3	1038,69		
	70	532,43	85,2	534,312		
B+%20 SK	58	2363,5	82,9	2381,61	PG 64-Y	
	64	1123,5	85	1127,72		
	70	584,86	86,3	586,075		



Şekil 4.14 : Orijinal bağlayıcıların G^* değerlerinin sıcaklıkla değişimi.

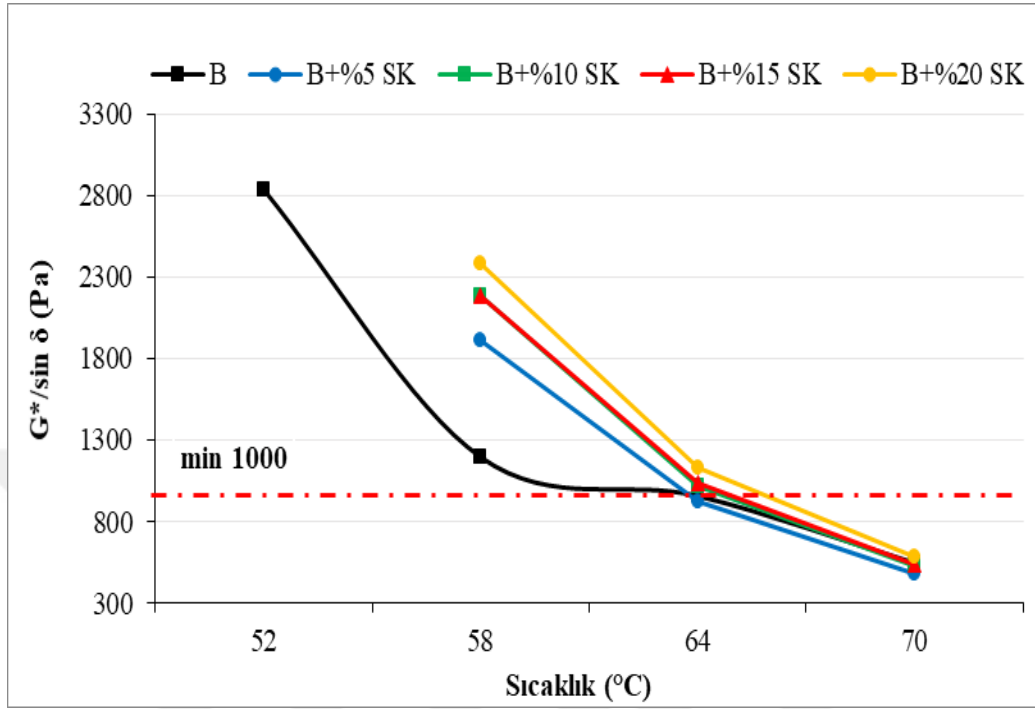


Şekil 4.15 : Orijinal bağlayıcıların δ° değerlerinin sıcaklıkla değişimi.

Çizelge 4.13 ve Şekil 4.14’de, bağlayıcıların G^* değerlerinin sıcaklıkla değişimi incelendiğinde, sıcaklığın artmasıyla tüm bağlayıcıların G^* değerlerinin azaldığı görülmektedir. G^* , tekrarlı kayma gerilmelerinin meydana getirdiği deformasyonlara karşı bağlayıcının gösterdiği toplam direncin ölçüsüdür. Bağlayıcıların G^* değerlerinin sıcaklığın artışıyla azalması, deformasyonlara karşı göstereceği direncin azaldığını göstermektedir. Ancak, aynı uygulama sıcaklıkları (58, 64 ve 70°C) göz önüne alındığında SK artışına bağlı olarak modifiye bağlayıcıların kayma modülü değerlerinde özellikle 58°C’de önemli artış görülmektedir. Ancak 64 ve 70°C sıcaklıklarda bu değerler birbirine yakın elde edilmiştir. Bu durum, bağlayıcılarda G^* değeri üzerinde SK’nın çok önemli bir etkiye sahip olmadığını veya bağlayıcının SK ile daha elastik bir katı hale geldiğini göstermektedir.

Çizelge 4.13 ve Şekil 4.15 birlikte incelendiğinde, saf ve SK modifiyeli bağlayıcıların sıcaklık arttıkça faz açısı değerlerinin arttığı görülmektedir. δ° değerinin artan sıcaklıkla artış göstermesi, bağlayıcının viskoz davranmaya başladığını yani kalıcı deformasyonlara karşı direncinin azaldığını ve yükleme etkisiyle daha fazla deformasyon yapacağını ifade etmektedir. Ancak modifiye bağlayıcıların aynı sıcaklıklardaki δ değerleri saf bağlayıcıya göre artış göstermiştir. Bu durum, SK ilavesiyle bağlayıcıların az da olsa daha viskoz hale geldiğini göstermektedir. Bu sonuç, SK katkılı bağlayıcıların kalıcı deformasyonlara karşı etkisinin düşük olabileceğini göstermesine rağmen, SK’nın bağlayıcıları sertleştirme eğilimi göz önüne alındığında bağlayıcıların SK ile daha elastik bir katı gibi davrandığını göstermektedir.

Orijinal saf ve SK katkıli bağlayıcıların tekerlek izi parametresi olan $G^*/\sin \delta$ değerlerinin sıcaklıkla değişimi Şekil 4.16’da verilmiştir.



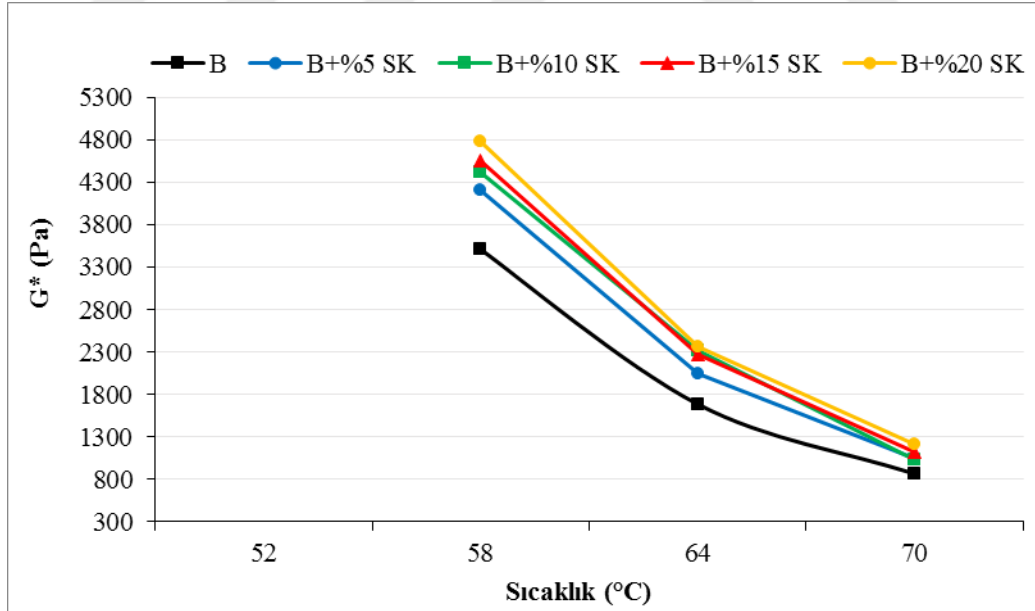
Şekil 4.16 : Orijinal bağlayıcıların $G^*/\sin \delta$ değerlerinin sıcaklıkla değişimi.

Şekil 4.16’da görüldüğü gibi, saf ve %5SK katkıli bağlayıcılar 58 °C, %10, %15 ve %20 SK katkıli bağlayıcılar ise 64 °C sıcaklıkta tekerlek izi parametresi olan $G^*/\sin \delta$ değerinin şartname limitini (min.1000 Pa) sağlamıştır. Tüm bu sonuçlardan saf ve %5SK katkıli bağlayıcıların yüksek sıcaklık performans sınıfı PG 58-Y, %10, %15 ve %20 SK katkıli bağlayıcıların yüksek sıcaklık performans sınıfı ise PG 64-Y olarak tespit edilmiştir.

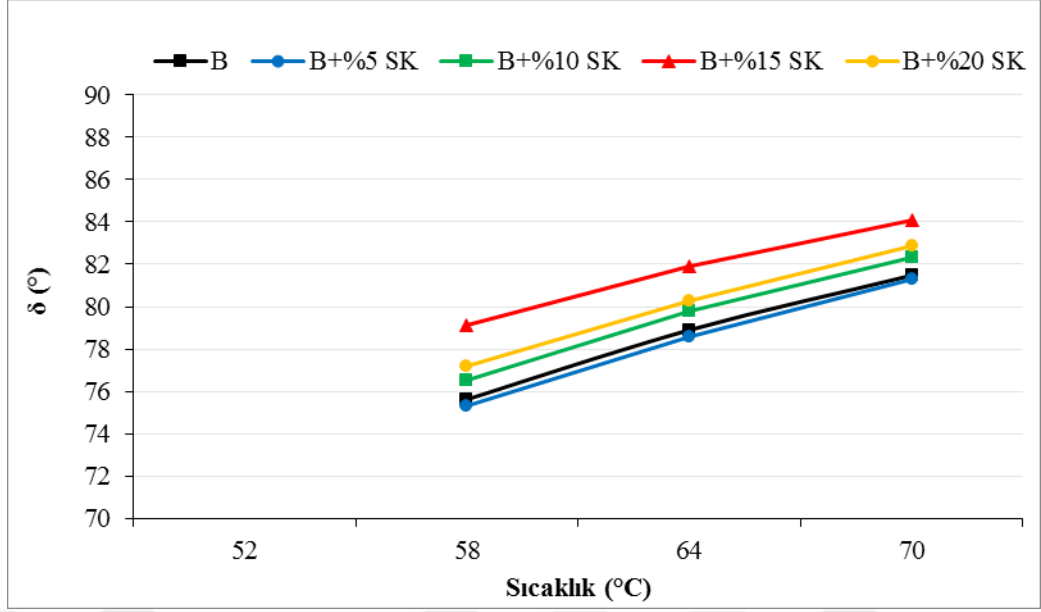
RTFOT ile yaşlandırılmış saf ve SK katkıli bağlayıcılar 58 °C, 64 °C ve 70 °C sıcaklıkta DSR deneyine tabi tutulmuş ve elde edilen sonuçlar Çizelge 4.14’de, tüm bağlayıcıların G^* ve δ değerlerinin sıcaklıkla değişimi ise sırasıyla Şekil 4.17 ve Şekil 4.18’de verilmiştir.

Çizelge 4.14 : RTFOT ile yaşlandırılmış bağlayıcıların DSR sonuçları.

Bağlayıcı Türü	Sıcaklık (°C)	G* (Pa)	δ (°)	G*/sin δ (Pa)	Şartname limitleri	Performans sınıfı
B	58	3505,6	75,6	3619,96	≥ 2200	PG 58-Y
	64	1685,9	78,9	1717,86		
	70	864,96	81,5	874,498		
B+%5 SK	58	4201	75,3	4343,16		PG 58-Y
	64	2050,9	78,6	2092,1		
	70	1050,5	81,3	1062,81		
B+%10 SK	58	4423,8	76,5	4549,503		PG 64-Y
	64	2317,1	79,8	2354,308		
	70	1030,7	82,3	1040		
B+%15 SK	58	4555,3	79,1	4639		PG 64-Y
	64	2266,1	81,9	2288,9		
	70	1119,87	84,1	1125,83		
B+%20 SK	58	4782,2	77,2	4904,65	PG 64-Y	
	64	2357,9	80,3	2392,1		
	70	1209,2	82,9	1218,54		



Şekil 4.17 : RTFOT ile yaşlandırılmış bağlayıcıların G* değerlerinin sıcaklıkla değişimi.

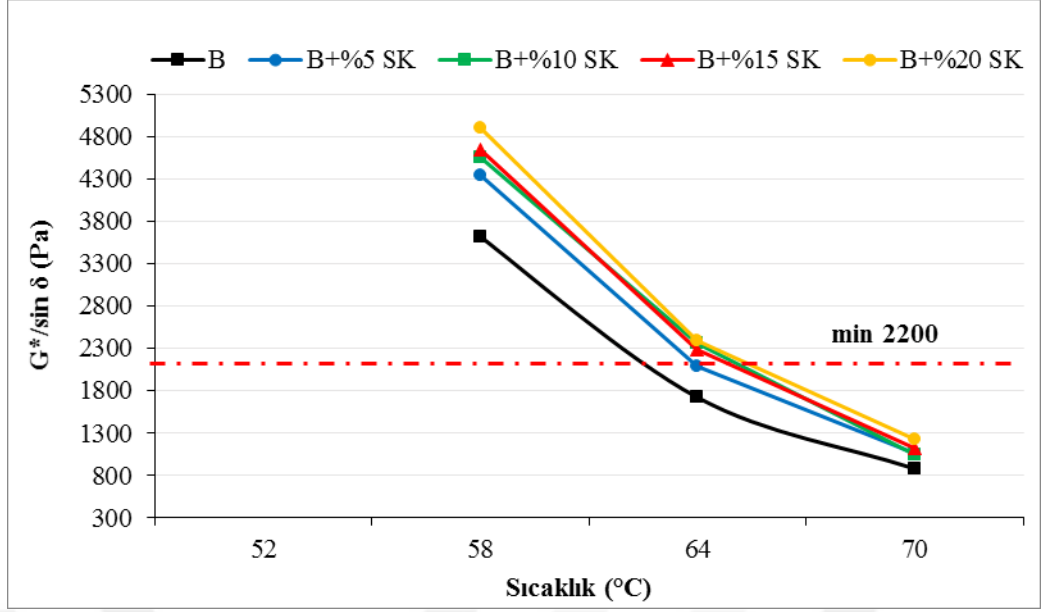


Şekil 4.18 : RTFOT ile yaşlandırılmış bağlayıcıların δ değerlerinin sıcaklıkla değişimi.

Şekil 4.17’de görüldüğü gibi, RTFOT ile yaşlandırılmış bağlayıcıların G^* değerleri sıcaklık arttıkça azalmaya başlamıştır. G^* değerinin azalması, bitümlü bağlayıcının kalıcı deformasyona karşı gösterdiği direncin azaldığını ifade etmektedir. SK katkı oranı arttıkça, aynı sıcaklıklarda tüm bağlayıcılar için G^* değeri artmaya başlamış, bu durum bağlayıcıların kalıcı deformasyonlara karşı gösterdikleri direncin arttığını göstermektedir.

Şekil 4.18 incelendiğinde, RTFOT ile yaşlandırılmış bağlayıcıların δ değerlerinin sıcaklık artışıyla arttığı görülmektedir. δ değeri, bağlayıcının viskoz davranışını ifade etmektedir. Sıcaklık ve katkı oranının artışıyla bu değer artması, bağlayıcının viskoz davranış sergilediğini ve kalıcı deformasyona karşı direncinin azalabileceğini göstermektedir. Ancak, bağlayıcıların SK ilavesiyle sertleşme eğilimi gösterdiği göz önüne alındığında, bu durum bağlayıcıların daha elastik bir yapıya büründüğü şeklinde yorumlanmaktadır.

RTFOT ile yaşlandırılmış saf ve SK katkılı bağlayıcıların $G^*/\sin \delta$ değerlerinin sıcaklıkla değişimi Şekil 4.19’da verilmiştir.



Şekil 4.19 : RTFOT ile yaşlandırılmış bağlayıcıların $G^*/\sin \delta$ değerlerinin sıcaklıkla değişimi.

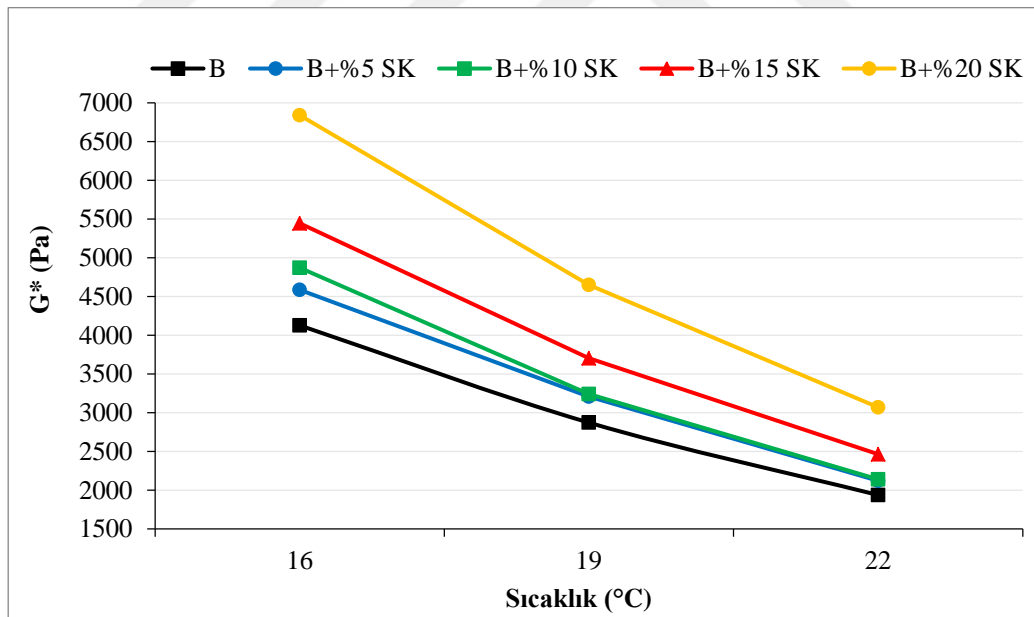
Şekil 4.19’da tekerlek izi parametresi olan $G^*/\sin \delta$ değerleri incelendiğinde, B+%10 SK, B+%15 SK ve B+%20 SK katkıli bağlayıcıların 64 °C sıcaklıkta şartname limitlerini sağladığı (min.2200 kPa) görülmektedir. B ve B+%5SK katkıli bağlayıcılar şartname limitlerini 58 °C sıcaklıkta sağlamaktadır.

Orijinal ve RTFOT ile yaşlandırılmış bağlayıcıların performans sınıfları incelendiğinde B ve B+%5 SK katkıli bağlayıcıların yüksek sıcaklık performans sınıfı PG 58-Y; B+%10 SK, B+%15 SK ve B+%20 SK katkıli bağlayıcıların yüksek sıcaklık performans sınıfı ise PG 64-Y olarak belirlenmiştir. SK katkı oranının artışıyla bağlayıcıların performans sınıfı artmış olup, bu durum SK katkısının yüksek sıcaklık performansına olumlu etki ettiğini göstermektedir.

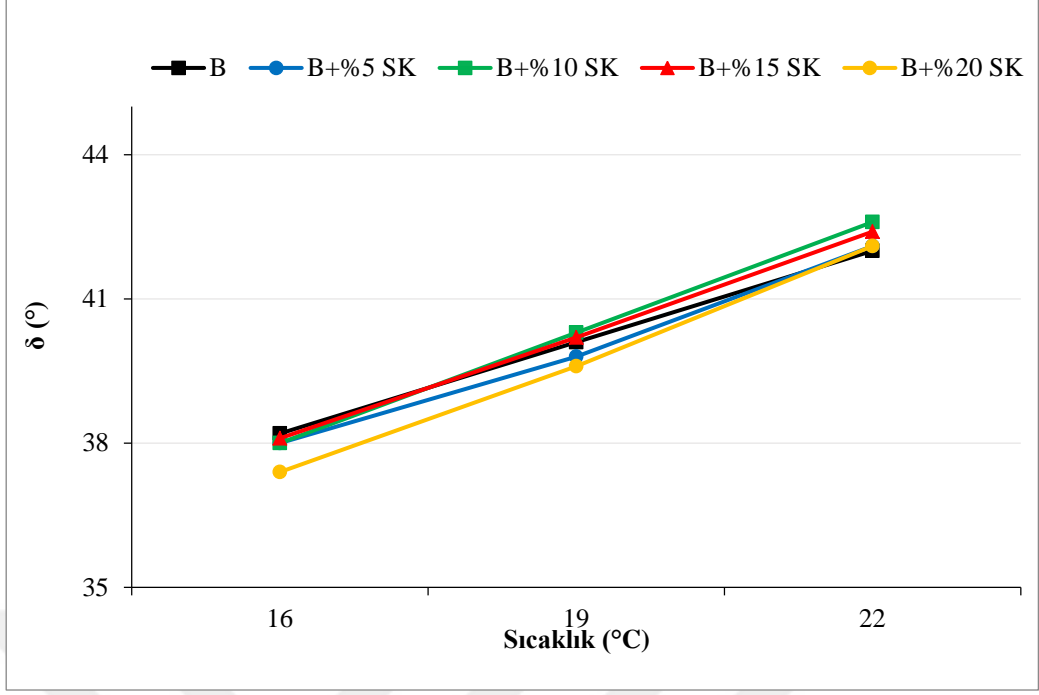
PAV ile yaşlandırılmış saf ve SK katkıli bağlayıcıların orta sıcaklıklardaki yorulma dirençlerini tespit etmek amacıyla 16 °C, 19 °C ve 22 °C sıcaklıkta yapılan DSR deney sonuçları Çizelge 4.15’de, bağlayıcıların G^* ve δ değerlerinin sıcaklıkla değişimi ise Şekil 4.20 ve Şekil 4.21’de verilmiştir.

Çizelge 4.15 : PAV ile yaşlandırılmış bağlayıcıların DSR sonuçları.

Bağlayıcı Türü	Sıcaklık (°C)	G* (Pa)	δ (°)	G*. sin δ	Şartname Limiti
B	16	4126,5	38,2	2330,15	≤ 5000
	19	2871,2	40,1	1691,30	
	22	1936,2	42	1186,71	
B+%5 SK	16	4584,8	38	2577,04	
	19	3206,0	39,8	1176,28	
	22	2119,6	42,1	1301,75	
B+%10 SK	16	4870,4	38	2737,57	
	19	3239,9	40,3	1916,70	
	22	2137,7	42,6	1326,07	
B+%15 SK	16	5444,0	38,1	3067,05	
	19	3702,6	40,2	2185,73	
	22	2462,6	42,4	1521,54	
B+%20 SK	16	6838,9	37,4	3790,55	
	19	4649,3	39,6	2592,56	
	22	3068,1	42,1	1884,26	



Şekil 4.20 : PAV ile yaşlandırılmış bağlayıcıların G* değerlerinin sıcaklıkla değişimi.

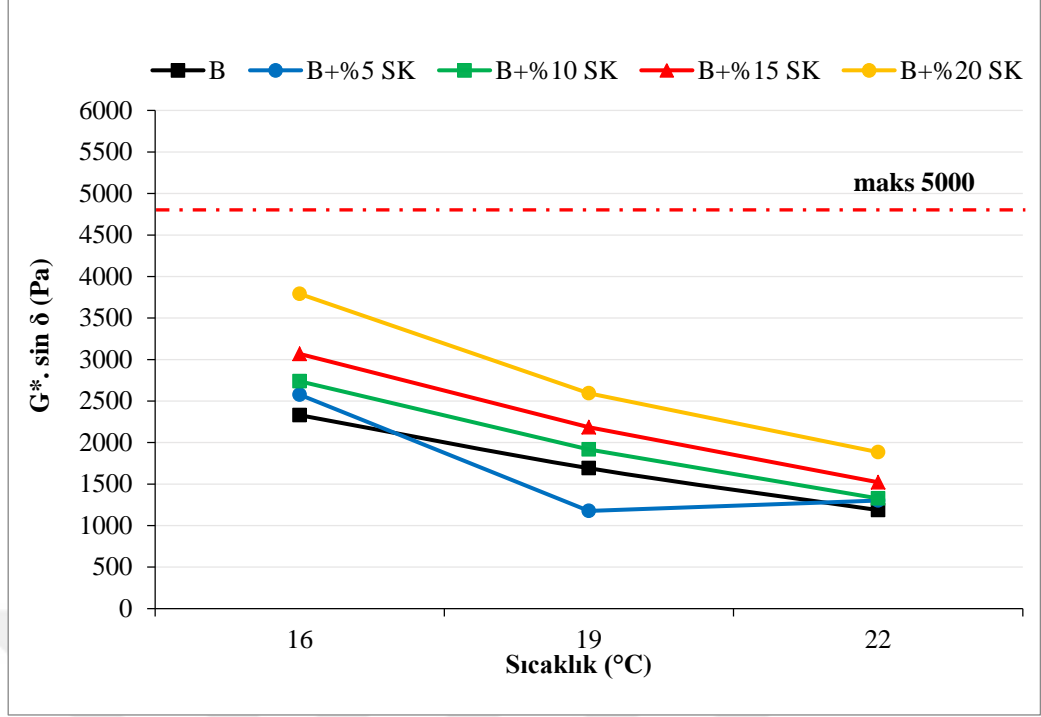


Şekil 4.21 : PAV ile yaşlandırılmış bağlayıcıların δ değerlerinin sıcaklıkla değişimi.

Şekil 4.20’de PAV ile yaşlandırılmış bağlayıcıların sıcaklık artışıyla birlikte G^* değerlerinin azaldığı görülmektedir. Ancak, SK katkı oranının artışıyla beraber, bağlayıcıların aynı sıcaklıklardaki G^* değerleri SK katkı artışı ile saf bağlayıcıya göre artış göstermiştir. Bu durum, SK katkılı bağlayıcıların saf bağlayıcıya göre kayma deformasyonu bakımından daha dirençli olduğunu göstermektedir.

Şekil 4.21 incelendiğinde, tüm bağlayıcıların δ değerlerinin, saf bağlayıcı ile hemen hemen aynı düzeyde olduğu görülmektedir. Bu durum, bağlayıcıların aynı elastiklik özelliklerine sahip olduğunu göstermektedir. Sıcaklık artışıyla, δ değerlerinin artış göstermesi, bağlayıcıların viskoz davranış sergilediğini göstermektedir. Dolayısıyla SK katkısının, PAV kalıntısı bağlayıcıların akıcılık özelliklerini pek fazla değiştirmedeğini ifade etmek mümkündür.

PAV ile yaşlandırılmış SK katkılı bağlayıcıların yorulma parametresi olan G^* . Sin δ değerlerinin sıcaklık ile değişimi Şekil 4.22’de verilmiştir.



Şekil 4.22 : PAV ile yaşlandırılmış bağlayıcıların $G^* \cdot \sin \delta$ değerlerinin sıcaklıkla değişimi.

Şekil 4.22 incelendiğinde, her üç sıcaklıkta da, bağlayıcıların yorulma parametresi değerlerinin şartname limiti olan 5000 Pa'ı aşmadığı görülmektedir. Katkı oranının artışıyla beraber bağlayıcıların yorulma parametresi değerleri artış göstermiş olsa da, şartname limitleri içerisinde kaldığı için, bu durumda SK katkılı bağlayıcıların elastikiyetinde artış meydana geldiği söylenebilir.

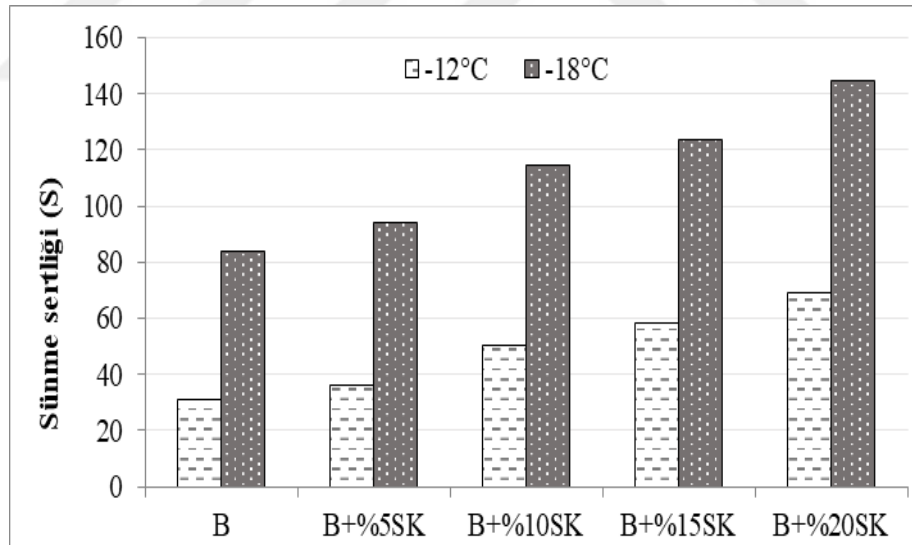
4.7.3 Kiriş eğme reometresi (BBR) deneyi

Bitümlü bağlayıcıların düşük sıcaklıklar altında meydana gelen termal çatlaklara karşı gösterdiği direnç BBR deneyi ile tespit edilmektedir. Bu çalışmada BBR deney cihazı kullanılmış olup AASHTO T313 standardına göre yapılmıştır. PAV deneyi ile yaşlandırılmış saf ve SK katkılı bağlayıcılar, yaklaşık 150 °C sıcaklıkta ısıtılıp, alüminyum kaplara dolduruldu ve soğuması için bekletildi. Daha sonra numuneler alüminyum kalıplardan çıkarılarak deney cihazında önceden sıcaklığı ayarlanmış sıviya bırakıldı (-12°C ve -18 °C) ve koşullandırıldı. Son aşamada ise kiriş şeklindeki numuneler cihaz mesnetleri arasına yerleştirilerek deney başlatıldı ve 240 saniye süreyle kiriş numuneye 980±5 mN (100±5 gr) yük uygulandı. Deney sona erdiğinde,

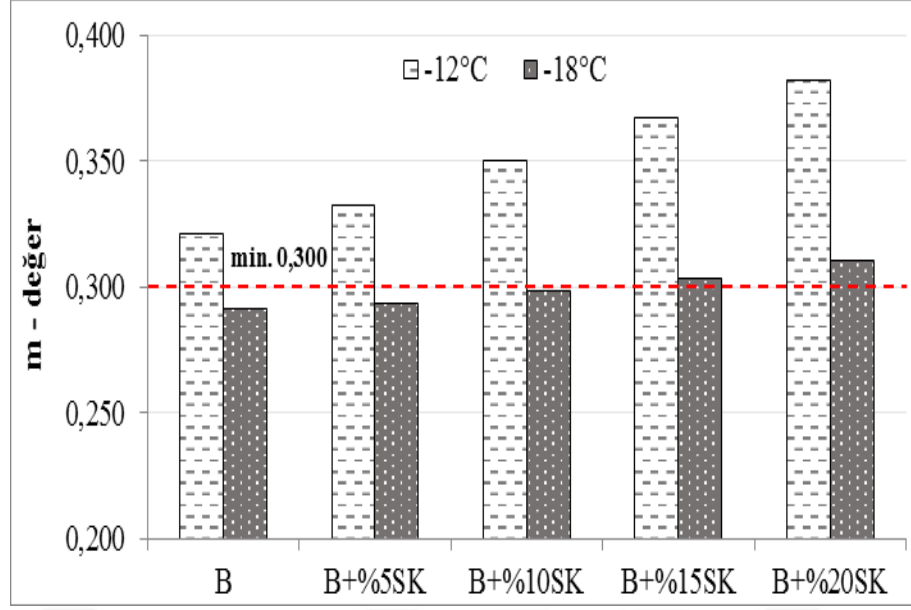
bağlayıcıların S değeri ve m-değeri cihaz yazılımı tarafından belirlenmiş oldu. Saf ve SK katkılı bağlayıcıların S-değeri ve m-değer sonuçları Çizelge 4.16’da, S ve m-değerlerinin katkı oranı ve sıcaklığa bağlı değişimleri Şekil 4.23 ve Şekil 4.24’ de verilmiştir.

Çizelge 4.16 : Bağlayıcıların BBR deney sonuçları.

Bağlayıcı Türü / Sıcaklık (°C)	B	B+%5 SK	B+%10 SK	B+%15 SK	B+%20 SK
Sünme Sertliği (Mpa) (Maks. 300 Mpa)					
-12	30,74	36,2018	50,4971	58,1818	69,1865
-18	84,0661	93,853	114,5036	123,3456	144,6973
m - değer (Min 0.300)					
-12	0,321	0,332	0,35	0,367	0,382
-18	0,291	0,293	0,298	0,303	0,31



Şekil 4.23 : Bağlayıcıların sünme sertliği değerleri.



Şekil 4.24 : Bağlayıcıların m değerleri.

Çizelge 4.16 ve Şekil 4.23'e göre, SK katkı oranının artışıyla (%5, 10, 15 ve 20) bağlayıcıların sünme sertliği değerleri artış göstermiştir. Superpave bağlayıcı şartnamesine göre bağlayıcının rijitlik değeri yani sünme sertliği değerinin maks.300MPa olması gerekmektedir. Bağlayıcıların sıcaklık azalışıyla sünme sertliği değerlerinin arttığı, ancak bununla beraber tüm bağlayıcıların şartname limitlerini sağladığı görülmektedir. Bu durum SK'nın bağlayıcıyı sertleştirmekle birlikte onu aynı zamanda daha elastik bir yapıya getirdiğini göstermektedir.

Şekil 4.24'de saf ve SK katkılı bağlayıcıların m-değer sonuçları incelendiğinde, sıcaklığın azalmasıyla m-değerin azaldığı görülmektedir. Bununla birlikte, sıcaklığın azalmasına rağmen (-18°C'de) %15 ve %20 SK katkılı bağlayıcılarda m-değerinin yüksek elde edilmiş olması yukarıdaki yorumu doğrular niteliktedir. Yani bağlayıcı SK ilavesi ile daha elastik bir kıvama gelmiş ve sertliğindeki değişim daha yavaş olmuştur. Superpave şartnamesine göre bağlayıcıların m-değerinin min. 0,300 olması beklenmektedir. Tüm sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde saf ve SK katkılı bağlayıcıların düşük sıcaklık performans dereceleri sırasıyla PGX-12, PGX-12, PGX-12, PGX-18 ve PGX-18 olarak belirlenmiştir.

Saf ve SK katkılı bağlayıcılar hem yüksek hem de düşük sıcaklık performansı bakımından değerlendirildiğinde B ve B+%5 SK katkılı bağlayıcıların PG 58-12, B+%10 SK katkılı bağlayıcının PG 64-12, B+%15 SK ve B+%20 SK katkılı bağlayıcıların ise PG 64-18 sınıfı olduğu tespit edilmiştir. Bu durumda, SK katkısının

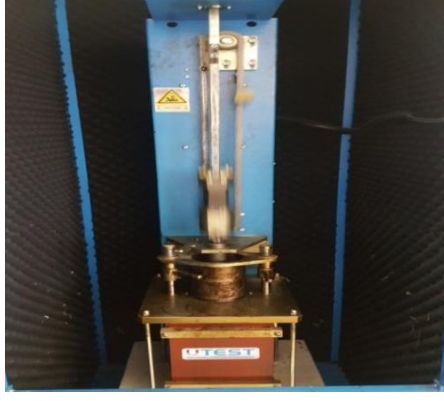
bağlayıcıların yüksek ve düşük sıcaklık performansı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu ve her iki sıcaklık için kritik oranın %15 SK katkılı bağlayıcı olduğu görülmektedir.

4.8 Bitümlü Sıcak Karışımların Hazırlanması

SK'nın BSK kaplama üzerindeki etkilerini belirlemek amacıyla %5, 10, 15 ve 20 SK oranlarında hazırlanan modifiye bağlayıcılar kullanılarak, Marshall tasarım yöntemine göre modifiye karışım numuneleri hazırlanmıştır. Daha sonra, saf ve SK katkılı karışım numuneleri üzerinde performans deneyleri gerçekleştirilmiştir.

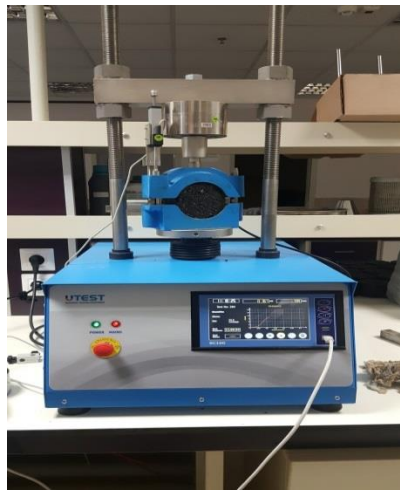
4.8.1 Marshall numunelerinin hazırlanması

Marshall tasarım yöntemi esas alınarak, ilk olarak kullanılacak olan saf bağlayıcı miktarı, kuru agrega ağırlığının yüzdesi (%3,5, %4, %4,5, %5, %5,5 ve %6) şeklinde alınarak karışımın optimum bitüm oranı tespit edildi. Bu amaçla, agrega numuneleri 155°C sıcaklıkta, bitümlü bağlayıcı ise daha önceden belirlenmiş olan karıştırma sıcaklığında ısıtıldı. Isıtılan agrega karıştırma kabına döküldü ve orta kısmında bir çukur açıldı. Daha sonra bu çukur içerisine ısıtılan bağlayıcı belirli miktarda buraya döküldü. Agregaların tamamı bitümlü bağlayıcı ile kaplanıncaya kadar (yaklaşık 1-2 dk. içerisinde) karıştırma cihazında karıştırıldı. Bu aşamadan sonra, önceden temizlenip hafif yağlanmış olan ve yaklaşık 155-160°C ısıtılmış olan kalıpların içerisine kalıp çapına uygun olacak şekilde kesilmiş olan aydinger kâğıdı koyuldu ve malzeme kalıp içerisine kürek yardımıyla yerleştirildi. Kalıp içerisinde malzemenin, zaman kaybı olmadan hızlıca 15 kenar ve 10 orta kısım olmak üzere toplam 25 defa sıcak cam çubuk ile şişleme işlemi yapıldı. Şişlenen malzeme üzerine tekrar aydinger kâğıdı koyularak sıkıştırma için Marshall tokmağına yerleştirildi. 457 mm. yükseklikten serbest olarak bırakılan tokmak, numuneye 75 ön yüz, 75 arka yüz olmak üzere toplam 150 vuruş yapıldı. Tüm işlem adımları aynı sırada takip edilerek her yüzdede en az üç numune hazırlandı. Karışım numunelerinin sıkıştırılmasında kullanılan Marshall tokmağı Şekil 4.25'de gösterilmiştir.



Şekil 4.25 : Marshall tokmağı.

Hazırlanan briket numuneleri, 24 saat kalıp içerisinde bekledikten sonra krikoyla kalıptan çıkarıldı. Daha sonra numunelerin alt ve üst yüzeyindeki pürüzler spatula yardımıyla düzeltildi ve bu numunelerin yükseklikleri en az üç yerden ölçülerek kaydedildi. Numunelerin havadaki kuru ağırlıkları alındıktan sonra, Arşimet terazisi yardımıyla sudaki ağırlıkları alındı ve son olarak doygun kuru yüzey ağırlıkları da belirlenerek tüm ağırlıklar kaydedildi. Deneye tabi tutmak için hazır hale getirilen numunelerin stabilite ve akma değerlerinin belirlenmesi için numuneler yaklaşık 30-40 dk kadar 60°C suda bekletildi. Sudan çıkarılan numuneler Marshall stabilite cihazına yerleştirilerek 50,8 mm/dak yükleme hızıyla yüklemeye başlandı. En yüksek yükleme değeri ve buna karşılık gelen akma değeri cihaz yazılımı tarafından otomatik olarak kaydedildi. Deneyde kullanılan Marshall stabilite ve akma cihazı Şekil 4.26'da gösterilmiştir.



Şekil 4.26 : Marshall stabilite ve akma cihazı.

4.8.2 Optimum bitüm yüzdesinin bulunması

Optimum bitüm oranının bulunması için yukarıda ifade edildiği gibi karışımda kullanılacak olan agreganın miktarı sabit tutularak, agreganın ağırlığının %3,5 - %4 - %4,5 - %5 - %5,5 - %6 oranlarında bitüm eklenerek her bir yüzde için 3'er adet numune, toplamda ise 18 adet numune hazırlanmıştır.

Tüm numunelerin havada, suda ve doymuş ağırlıkları belirlenip hacimleri ve birim hacim ağırlıkları hesaplanmıştır. Daha sonra formül 4.3- 4.16 kullanılarak numunelerin hacim özgül ağırlıkları (D_p), boşluk oranları (V_h), agregalar arası boşluk oranları (VMA) ve asfaltla dolu boşluk oranları (V_f) belirlenmiştir. Daha sonra numuneler Marshall stabilite ve akma deneyine tabii tutularak stabilite ve akma değerleri belirlenmiştir.

Bulunan bu değerler yardımıyla stabilite, D_p , V_h , V_f ve akma - % bitüm grafikleri elde edilmiştir.

$$V = B-C \quad (4.3)$$

$$D_p = A/V \quad (4.4)$$

$$D_{port} = (D_{p1} + D_{p2} + D_{p3})/3 \quad (4.5)$$

$$W_a = (W_B/W_A) \times 100 \quad (4.6)$$

$$W_b = [(W_B/W_A + W_B)] \times 100 \quad (4.7)$$

$$G_{sb} = 100 / [(\%K/G_k - h) + (\%I/G_i - h) + (\%F/G_f - z)] \quad (4.8)$$

$$G_{sa} = 100 / [(\%K/G_k - z) + (\%I/G_i - z) + (\%F/G_f - z)] \quad (4.9)$$

$$D_t = 100 / [(100 - W_b/G_{se}) + (W_b/G_b)] \quad (4.10)$$

$$G_{se} = (G_{sb} + G_{sa})/2 \quad (4.11)$$

$$V_h = [(D_t - D_{port})/D_t] \times 100 \quad (4.12)$$

$$V_b = (P_{be} \times D_{port})/G_b \quad (4.13)$$

$$V_a = 100 - (V_h + V_b) \quad (4.14)$$

$$V_{ma} = 100 - V_a = (V_h + V_b) \quad (4.15)$$

$$V_f = (V_b/V_{ma}) \times 100 \quad (4.16)$$

Formül 4.3-4.16 arasında yer alan;

- W_a : Agregaya göre seçilen bitüm %'si,
W_b : Karışıma göre seçilen bitüm %'si,
W_A : Toplam agrega ağırlığı (1200gr),
W_B : Bitüm ağırlığı (agregaya göre),
A : Havadaki kuru ağırlık,
B : Doygun-yüzey kuru ağırlık,
C : Sudaki ağırlık,
V : Numunenin hacmi,
D_p : Numunenin pratik hacim özgül ağırlığı,
D_{port} : Numunelerin ortalama pratik hacim özgül ağırlığı,
D_t : Numunenin teorik Max. özgül ağırlığı,
V_h : Numunedeki boşluk yüzdesi,
V_b : Numunedeki efektif bitüm hacmi %'si,
V_a : Numunedeki agrega hacmi %'si,
V_{ma} : Agregalar arasındaki boşluk %'si,
V_f : V_{ma}'nın bitümlle dolu boşluk %'si,
P_{be} : Agreg ağırlığına göre efektif bitüm %'si,
G_{sb} : Agreg ağırlığına göre efektif bitüm ağırlığı,
G_{sa} : Agreg ağırlığına göre efektif bitüm ağırlığı,
G_{se} : Agreg efektif özgül ağırlığı,
%K : Karışımdaki kaba agreg ağırlığı,
%İ : Karışımdaki ince agreg ağırlığı,
%F : Karışımdaki filler %'si olarak ifade edilir.

Hazırlanan deney numunelerinden %3,5 bitüm içeren ilk numuneye ait gerekli ölçüm ve hesaplamalar aşağıda gösterilmiştir:

$$\text{Kaba agregası} = \%42 \quad , \text{Gk-h} = 2,648 \text{ gr/cm}^3$$

$$\text{İnce agregası} = \%53 \quad , \text{Gi-h} = 2,664 \text{ gr/cm}^3$$

$$\text{Filler} = \%5 \quad , \text{Gf-z} = 2,751 \text{ gr/cm}^3$$

$$\text{Bitüm oranı} = \%3,5 \quad , \text{Gb} = 1,032 \text{ gr/cm}^3$$

$$\text{Agrega toplam ağırlığı} = 1200 \text{ gr}$$

$$\text{Wa} = (42/1200) \times 100 = 3,5$$

$$\text{Wb} = (42/(42+1200)) \times 100 = 3,38$$

$$\text{V} = 1238 - 705,8 = 532,2 \text{ cm}^3$$

$$\text{Dp} = 1228,2 / 532,2 = 2,308 \text{ gr/cm}^3$$

$$\text{Dp}_{\text{ort}} = (2,308 + 2,294 + 2,312) / 3 = 2,305 \text{ gr/cm}^3$$

$$\text{Gsb} = 100 / [(42/2,648) + (53/2,664) + (5/2,751)] = 2,661 \text{ gr/cm}^3$$

$$\text{Gsa} = 100 / [(42/2,711) + (53/2,750) + (5/2,751)] = 2,733 \text{ gr/cm}^3$$

$$\text{Dt} = 100 / [(100 - 3,38) / 2,701 + (3,38) / 1,032] = 2,558 \text{ gr/cm}^3$$

$$\text{Gse} = (2,661 + 2,733) / 2 = 2,697 \text{ gr/cm}^3$$

$$\text{Vh} = [(2,558 - 2,305) / 2,558] \times 100 = 9,9$$

$$\text{Vb} = (2,88 \times 2,305) / 1,032 = 6,43$$

$$\text{Va} = 100 - (9,9 + 6,43) = 83,67$$

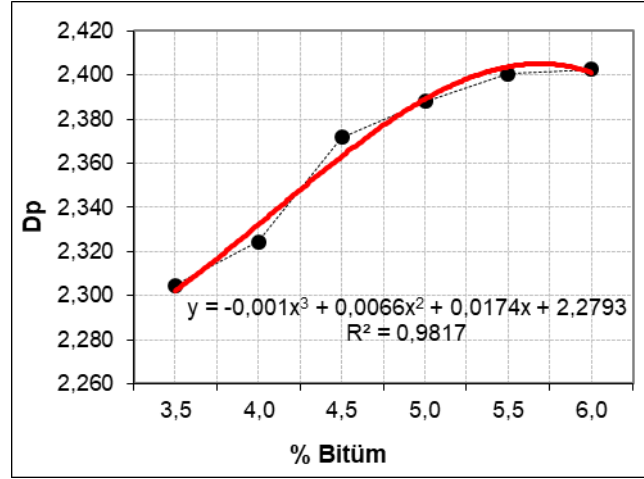
$$\text{Vma} = 100 - 83,67 = 16,33$$

$$\text{Vf} = (6,43 / 16,33) \times 100 = 39,40$$

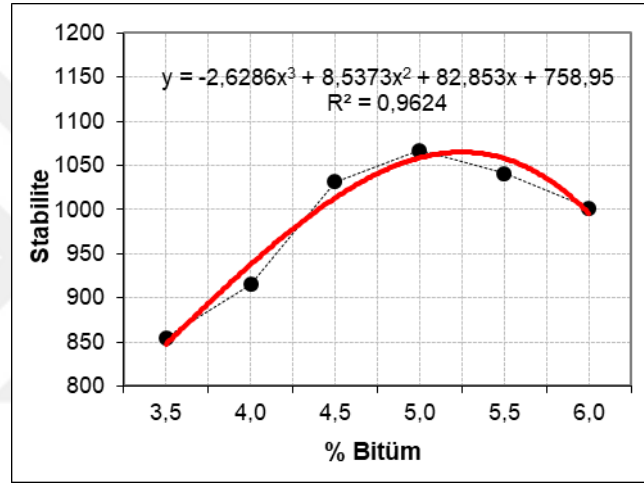
Aynı şekilde her bitüm yüzdesi ve her numune için hesaplamalar yapılmış olup tabloya aktarılmıştır. Elde edilen tüm sonuçlar Çizelge 4.17’de gösterilmiştir. Karışımların Dp, stabilite, akma, Vh, Vma, Vf ile bitüm yüzdesi arasındaki ilişki sırasıyla Şekil 4.27-32’de verilmiştir.

Çizelge 4.17 : B 160/220 saf karışımın optimum bitüm belirlenmesine ait deney sonuçları.

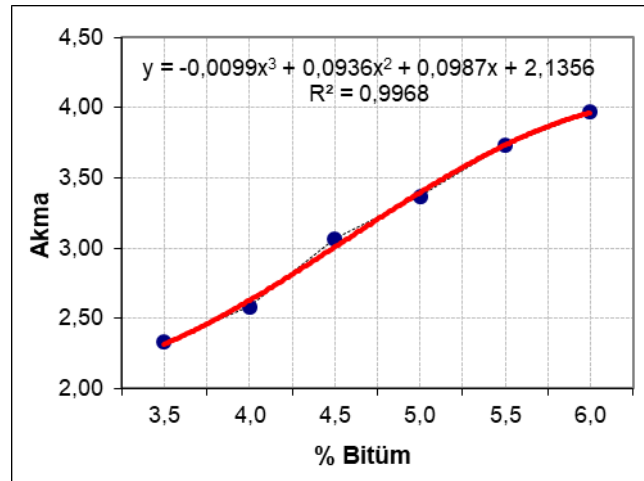
No	Wa (%)	Wb (%)	WB (gr)	Numune Yüksekliği (mm)				A (hava) (gr)	C (su) (gr)	B (doy.) (gr)	V (cm ³)	Dp (gr/cm ³)	Dt (gr/cm ³)	Vh (%)	Vb (%)	Va (%)	Vma (%)	Vf (%)	Akma (mm)	Stb. (kN)	Dz.Fak.	Dz.Stb (kG)
				1	2	3	Ort															
1	3,5	3,38	42,00	67,1	66,4	66,8	66,75	1228,2	705,8	1238	532,2	2,308							2,34	9,8	0,897	879
2				66,3	65,4	67,5	66,4	1224,8	701,9	1235,9	534	2,294							2,13	9,8	0,888	870
3	2,98	2,88		66,8	66,6	67,2	66,87	1223	701,2	1230,1	528,9	2,312							2,52	9,2	0,886	815
ORTALAMALAR												2,305	2,558	9,90	6,43	83,67	16,33	39,40	2,33			855
4	4,0	3,85	48,00	67,0	66,7	65,9	66,52	1233,3	712,4	1242,5	530,1	2,327							2,8	10	0,894	894
5				66,3	67,2	66,3	66,6	1230,2	707,9	1237,1	529,2	2,325							2,54	10	0,906	906
6	3,48	3,35		66,5	66,5	66,0	66,34	1232,3	710,8	1241,6	530,8	2,322							2,41	10,31	0,918	946
ORTALAMALAR												2,324	2,540	8,48	7,54	83,98	16,02	47,06	2,583			915
7	4,5	4,31	54,00	64,8	65,5	65,8	65,37	1243,3	721,3	1248,5	527,2	2,358							3	11,5	0,930	1070
8				66,5	65,1	66,2	65,9	1239,9	721,5	1242,5	521	2,380							3,10	10,5	0,930	977
9	3,98	3,81		64,3	65,2	64,8	64,77	1238,2	722,2	1243	520,8	2,377							3,10	11,4	0,920	1049
ORTALAMALAR												2,372	2,522	5,95	8,76	85,29	14,71	59,53	3,067			1032
10	5,0	4,76	60,00	65,5	66,4	65,1	65,67	1245,2	726	1249,1	523,1	2,380							3,5	11,5	0,949	1091
11				66,9	66,4	65,7	66,3	1246,7	727,5	1248,1	520,6	2,395							3,30	10,8	0,938	1013
12	4,48	4,27		64,7	66,2	66,9	65,93	1245,5	727,7	1249,1	521,4	2,389							3,30	11,6	0,945	1096
ORTALAMALAR												2,388	2,505	4,66	9,88	85,46	14,54	67,93	3,367			1067
13	5,5	5,21	66,00	65,2	65,5	64,6	65,1	1250,8	733,8	1252,3	518,5	2,412							4	11,3	0,951	1075
14				64,7	65,4	65,7	65,3	1250,1	730,4	1253,4	523	2,390							3,50	10,7	0,953	1020
15	4,98	4,72		64,5	65,4	65,1	65	1252,1	733,2	1255	521,8	2,400							3,70	10,8	0,952	1028
ORTALAMALAR												2,401	2,488	3,51	10,99	85,51	14,49	75,80	3,733			1041
16	6,0	5,66	72,00	66,3	65,1	65,0	65,47	1259,8	736,6	1262,4	525,8	2,396							3,8	10,1	0,955	965
17				64,7	63,2	65,9	64,6	1259,5	736,8	1260,8	524	2,404							3,80	10,7	0,967	1035
18	5,48	5,17		65,7	65,8	66,1	65,87	1260,6	739,3	1262,8	523,5	2,408							4,30	10,6	0,949	1006
ORTALAMALAR												2,403	2,472	2,79	12,04	85,17	14,83	81,18	3,967			1002



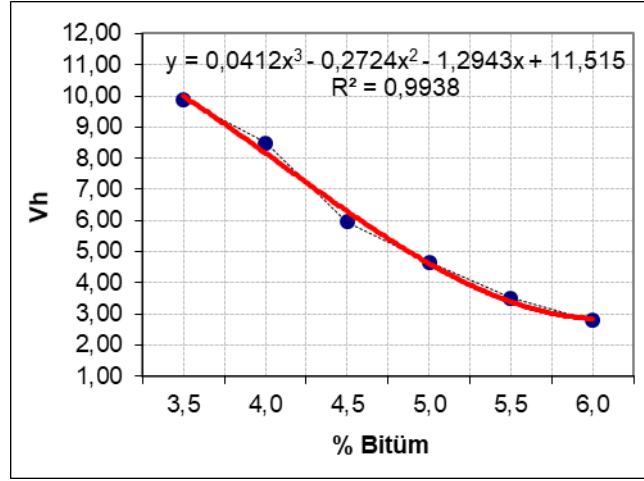
Şekil 4.27 : Dp- Bitüm %'si.



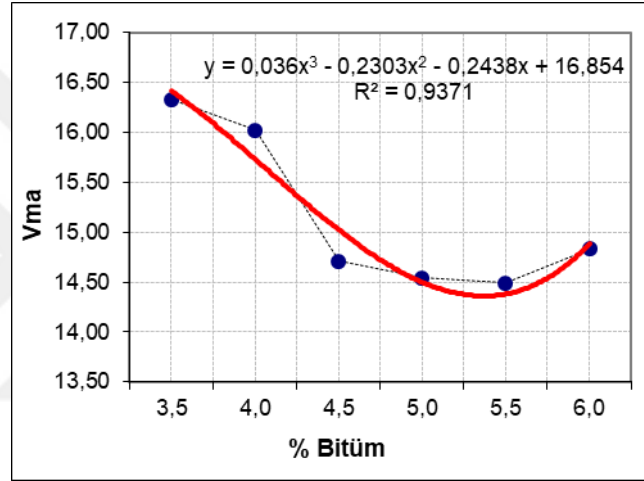
Şekil 4.28 : Stabilite- Bitüm %'si ilişkisi.



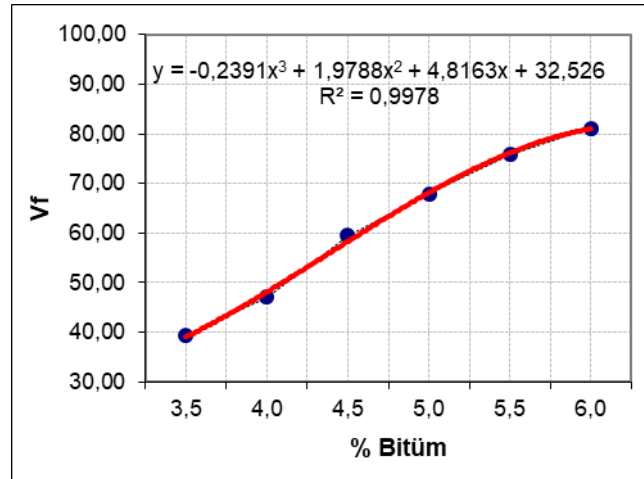
Şekil 4.29 : Akma – Bitüm %'si.



Şekil 4.30 : Vh- Bitüm %'si.



Şekil 4.31 : VMA- Bitüm %'si.



Şekil 4.32 : Vf- Bitüm %'si.

Çizilen grafiklerden boşluk oranının %4'e, asfaltla dolu boşluk oranının %70'e, stabilite ve hacim özgül ağırlığın ise en yüksek değere karşılık geldiği yüzdeler alınmıştır. Bulunan değerlerin aritmetik ortalaması alınarak karışımın optimum bitüm yüzdesi %5,3 olarak belirlenmiştir. Çizelge 4.18'de optimum bitüm içeriğinde kullanılan hesaplamalar gösterilmiştir.

Çizelge 4.18 : Optimum bitüm içeriğinde kullanılan değerler.

Kriterler	Sonuçlar
Maks. Dp	5,75
Maks. Stabilite	5,0
%4 V _h	5,25
%70 V _f	5,1
Optimum bitüm oranı	%5,3

Elde edilen optimum bitüm yüzdesinde üç adet kontrol numunesi hazırlanmıştır. Kontrol numuneleri üzerinde de hesaplamalar yapılarak elde edilen değerlerin uygunluğu Karayolları Teknik Şartnamesi (KTŞ) değerleri ile karşılaştırılmıştır. Kontrol numunelerine ait elde edilen sonuçlar Çizelge 4.19'da verilmiştir. Sonuçların KTŞ asfalt betonu aşınma için verilmiş olan sınır değerleri sağladığı görülmüştür.

Çizelge 4.19 : Kontrol numunesine ait sonuçlar.

No	Wa (%)	Wb (%)	WB (gr)	Numune Yüksekliği (mm)				A (hava) (gr)	C (su) (gr)	B (doy.) (gr)	V (cm ³)	Dp (gr/cm ³)	Dt (gr/cm ³)	Vh (%)	Vb (%)	Va (%)	Vma (%)	Vf (%)	Akma (mm)	Sfb (kN)	Dz.Fak	Dz.Stb (kg)
				1	2	3	Ort															
1	5,3	5,03	0,00	66,3	65,8	66,5	66,2	1244,9	722,8	1245,7	522,9	2,381							3,55	11,2	0,936	1048
2				66,3	65,8	65,6	65,9	1247,9	726,3	1248,5	522,2	2,390							3,10	11,3	0,943	1066
3	4,86	4,61		65,1	65,8	65,3	65,4	1246,1	724,2	1245,5	521,3	2,390							3,30	11,1	0,951	1056
OPTİMUM BİTÜM ORANI SONUÇLARI											2,387	2,509	4,85	10,68	84,47	15,53	68,77	3,317			1057	
ŞARTNAME LİMİTLERİ													(3-5)			>14	(65-75)	(2-4)	Sf/Ak=	318,54	>900	

Belirlenen bu optimum bitüm yüzdesi (%5,3) kullanılarak saf ve SK modifiyeli karışım numuneleri hazırlanmış ve performans deneylerine tabi tutulmuştur. Hazırlanmış olan modifiye karışımların saf karışımlarla kıyaslanabilmesi için bu oran sabit tutulmuştur.

4.9 Karışımlar Üzerinde Uygulanan Performans Deneyleri

Bu çalışmada, Marshall karışım tasarım yöntemiyle bulunan optimum bitüm içeriğinde saf ve SK katkılı modifiye karışımlar üzerinde Marshall stabilite ve akma deneyi, kalıcı Marshall stabilitesi deneyi (RMS), dolaylı çekme mukavemeti deneyi (ITS), dolaylı çekme esneklik modülü deneyi (ITSM) ve statik sünme deneyleri uygulanmıştır. Tüm bu deneylere tabi tutulmak amacıyla hazırlanan numune sayıları Çizelge 4.20’de verilmiştir.

Çizelge 4.20 : Performans deneylerinde kullanılan numune sayıları.

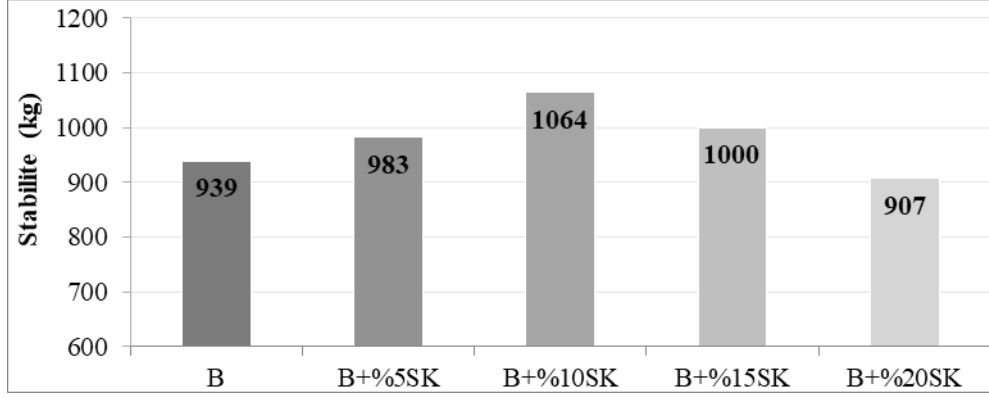
Karışım Türü	Performans deneyleri				
	Marshall stabilite ve akma	RMS	ITS	ITSM	Sünme
B	3	3	6	3	3
B+%5 SK	3	3	6	3	3
B+%10 SK	3	3	6	3	3
B+%15 SK	3	3	6	3	3
B+%20 SK	3	3	6	3	3
Toplam	15	15	30	15	15
Genel toplam: 90					

4.9.1 Marshall stabilite ve akma deney sonuçları

B 160/220 penetrasyon sınıflı saf bitüm ve %5, 10, 15 ve 20 oranlarında SK katkılı modifiye bitümlü karışımlar kullanılarak optimum bitüm içeriğinde hazırlanan numuneler üzerinde Marshall stabilite ve akma deneyi yapılmıştır. ASTM D 1559 standardına göre, numuneler yaklaşık 40 dakika 60°C suda bekletilerek daha sonra deneye tabi tutulmuştur. SK katkılı karışım numunelerinin stabilite ve akma sonuçları Çizelge 4.21’de verilmiştir. Elde edilen stabilite değerlerinin SK katkı oranı ile değişimi Şekil 4.33.de, akma değerlerinin SK katkı oranı ile değişimi ise Şekil 4.34’de verilmiştir.

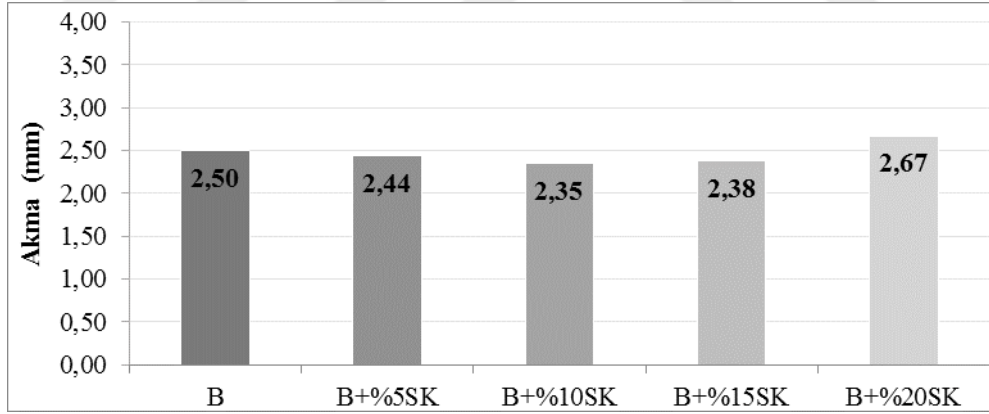
Çizelge 4.21 : SK katkılı karışım numunelerinin Marshall stabilite ve akma değerleri.

KARIŞIM TÜRÜ	No	Wa	Wb	WB	Yüksekliği (mm)				A (hava)	C (su)	B (doy.)	V	Dp	Dt	Vh	Vb	Va	Vma	Vf	Akma	Stb.	Dz.Fak.	Dz.Stb
		(%)	(%)	(gr)	1	2	3	Ort	(gr)	(gr)	(gr)	(cm ³)	(gr/cm ³)	(gr/cm ³)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(mm)	(kN)		(kG)
SAF	1	5,3	5,03	63,60	71,6	71,9	71,4	71,6367	1252,8	727	1253,2	526,2	2,381							2,6	11,06	0,819	906
	2				71,2	71,2	71,5	71,30	1258,9	733,7	1259,6	525,9	2,394							2,42	11,87	0,826	981
	3	4,86	4,61		71,8	71,7	72,1	71,8333	1256,1	726,3	1256,5	530,2	2,369							2,48	11,41	0,815	930
	ORTALAMALAR												2,381	2,509	5,08	10,65	84,27	15,73	67,71	2,5			939
%5 SK	4	5,3	5,03	63,60	67,5	67,4	67,1	67,3167	1256	727,7	1256,8	529,1	2,374							2,36	10,73	0,889	954
	5				66,2	66,9	66,5	66,5	1255,4	727,7	1255,7	528	2,378							2,46	10,87	0,889	967
	6	4,86	4,61		67,2	67,6	67,2	67,3333	1267	734,2	1267,4	533,2	2,376							2,50	11,76	0,875	1029
	ORTALAMALAR												2,376	2,509	5,29	10,63	84,08	15,92	66,75	2,44			983
%10 SK	7	5,3	5,03	63,60	68,9	68,3	68,6	68,6133	1257,6	729,1	1260,8	531,7	2,365							2,32	11,79	0,876	1033
	8				67,7	68,3	67,8	68,0	1256,4	728,6	1258,9	530,3	2,369							2,40	12,09	0,902	1091
	9	4,86	4,61		68	68,3	68,7	68,3267	1256,6	727,3	1260,6	533,3	2,356							2,34	12,05	0,886	1068
	ORTALAMALAR												2,364	2,509	5,78	10,57	83,64	16,36	64,64	2,35			1064
%15 SK	10	5,3	5,03	63,60	68,3	68,8	68,4	68,4833	1252,3	726,6	1255,3	528,7	2,369							2,4	11,74	0,886	1040
	11				68,4	68,6	68,4	68,5	1249,5	725,5	1252	526,5	2,373							2,48	10,28	0,900	925
	12	4,86	4,61		69,2	68,9	69,2	69,1033	1256,6	723,3	1259,2	535,9	2,345							2,28	11,59	0,892	1034
	ORTALAMALAR												2,362	2,509	5,84	10,57	83,59	16,41	64,42	2,38			1000
%20 SK	13	5,3	5,03	63,60	69,3	69,5	68,4	69,0267	1260,8	729,9	1263,4	533,5	2,363							2,84	9,692	0,915	887
	14				67,4	68,0	68,4	67,9	1243,9	723,8	1252,6	528,8	2,352							2,55	9,929	0,934	927
	15	4,86	4,61		68,2	68,4	69,2	68,57	1251,9	726,3	1255,7	529,4	2,365							2,62	9,908	0,915	907
	ORTALAMALAR												2,360	2,509	5,92	10,56	83,52	16,48	64,07	2,67			907



Şekil 4.33 : SK katkı oranı ile stabilitenin değişimi.

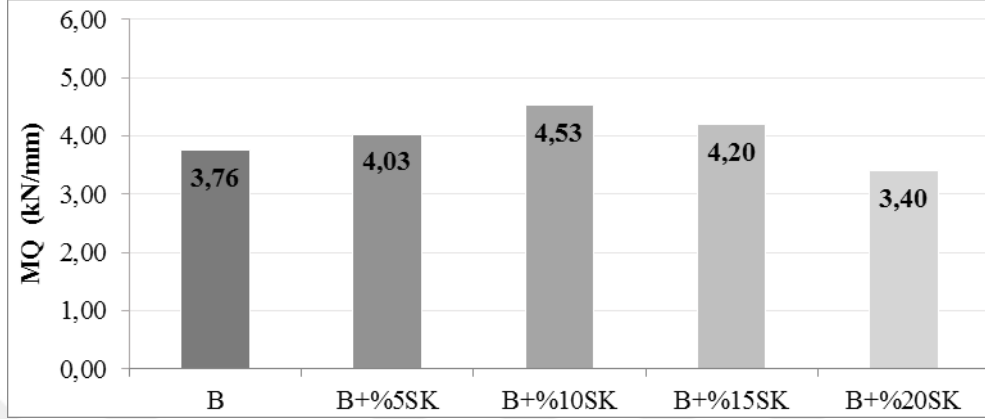
Şekil 4.33’de, katkı oranının artışıyla (%5, 10, 15 ve 20) saf ve SK katkılı karışımların stabilite değerlerinin arttığı görülmektedir. %10 SK katkılı karışımın stabilite değerinin, saf karışımdan yüksek olduğunu ve modifiye karışımlardaki en yüksek stabilite değerinin de %10 SK katkılı karışım numunesinde olduğu görülmüştür. SK katkısıyla stabilitenin artış göstermesi, BSK kaplamada meydana gelecek deformasyonlara karşı direncin yüksek olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.34 : SK katkı oranı ile akma değerlerinin değişimi.

Şekil 4.34’de SK oranı arttıkça karışımların akma değerleri, saf karışıma göre kısmen artış göstermiş olsa da hemen hemen aynı düzeyde kabul edilebilir. Akma, kaplamanın trafik yükleri altında plastiklik ve esneklik davranışını belirleyen bir değerdir. SK katkısıyla akma miktarının aynı düzeyde kalması, kaplamanın kırılma anındaki davranışının fazla değişmediğini göstermektedir.

Saf ve SK katkılı karışım numunelerin stabilite değerlerinin akma değerlerine bölünmesiyle Marshall oranı (MQ) değerleri hesaplanarak sonuçlar Şekil 4.35’de verilmiştir.



Şekil 4.35 : Katkı oranının artışı ile MQ değerlerinin değişimi.

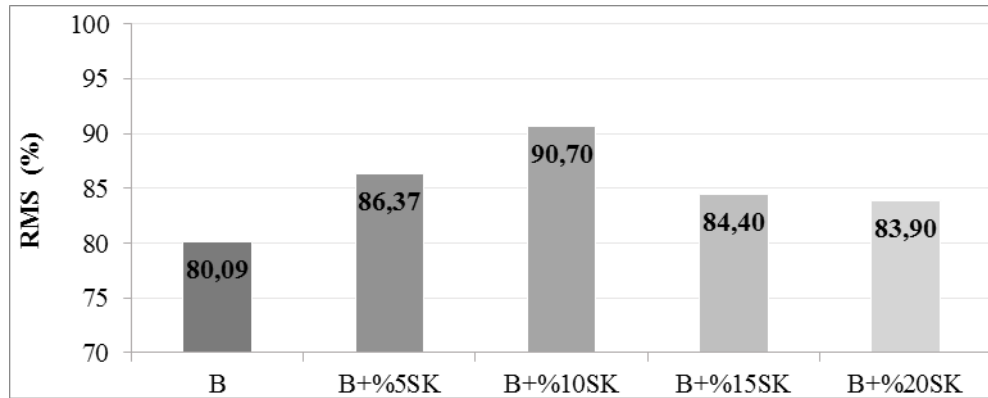
Şekil 4.35’da saf ve SK katkılı karışımların MQ değerleri incelendiğinde katkı oranının artışıyla özellikle %10 SK katkılı karışımlarda önemli artış meydana gelmiştir. Bu sonuçlara göre saf karışıma göre %10 SK katkılı karışımların kayma gerilmelerine karşı en yüksek direnci göstereceği görülmüştür.

4.9.2 Kalıcı marshall stabilitesi (RMS) deney sonuçları

BSK’ların suya karşı hassasiyetinin belirlenmesi için uygulanan RMS deneyinde, saf ve SK katkılı karışım numuneleri 24 saat boyunca 60 °C sıcaklıktaki suda bekletilerek Marshall stabilite deneyine tabi tutulmuştur. Çalışmada, 24 saat suda bekletilen numuneler ‘Şartlanmış’, 40 dakika bekletilen numuneler ise ‘Şartlanmamış’ olarak adlandırılmıştır. RMS değeri, şartlanmış numunelerin stabilite değerlerinin şartlanmamış numunelerin stabilite değerlerine bölünmesiyle elde edilmektedir. Elde edilen RMS değerleri Çizelge 4.22’de, değerlerin katkı oranına göre değişimi ise Şekil 4.36’de verilmiştir.

Çizelge 4.22 : RMS deney sonuçları.

Karışım Türü	Numune No	Şartlanmış	Ortalama	Şartlanmamış	Ortalama	RMS (%)
B	1	7,11		9,06		
	2	7,96	7,52	9,81	9,39	%80,09
	3	7,48		9,30		
B+%5 SK	1	9,49		9,54		
	2	8,45	8,49	9,67	9,83	%86,37
	3	8,87		10,29		
B+%10 SK	1	9,61		10,33		
	2	9,68	9,65	10,91	10,64	%90,70
	3	9,65		10,68		
B+%15 SK	1	8,43		10,40		
	2	8,34	8,44	9,25	10,00	%84,4
	3	8,55		10,34		
B+%20 SK	1	7,49		8,87		
	2	7,62	7,61	9,27	9,07	%83,90
	3	7,73		9,07		



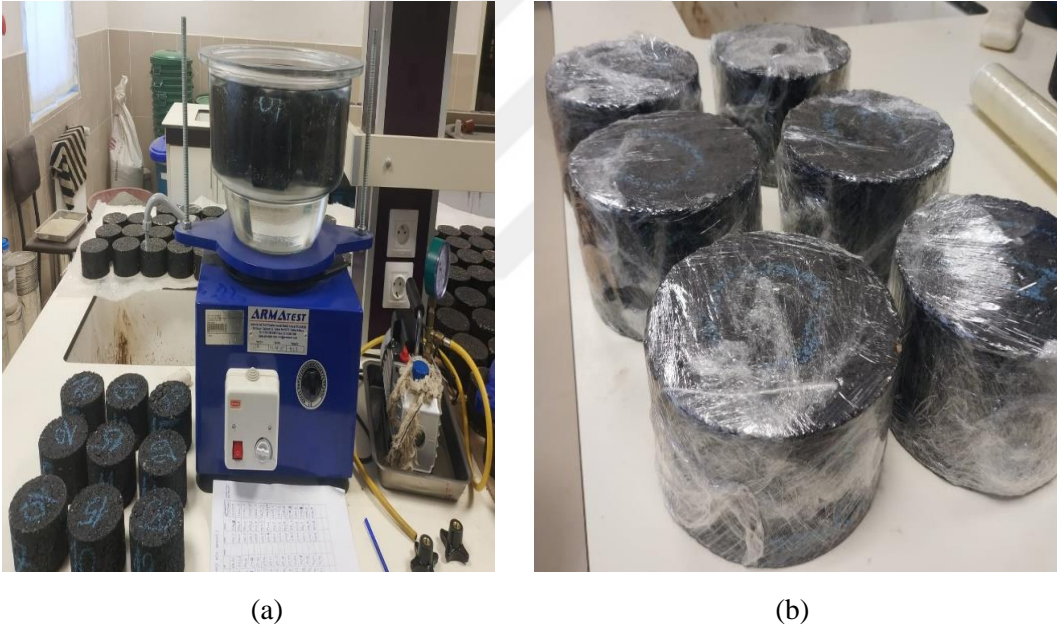
Şekil 4.36 : RMS değerlerinin katkı oranına göre değişimi.

Şekil 4.36 incelendiğinde, saf ve SK katkılı karışımların, suya karşı dayanımlarının %70-90 aralığında olduğu görülmektedir. En yüksek RMS oranı ise %10 SK katkılı karışımda görülmektedir. SK katkısıyla RMS değerinin artış göstermesi, SK'nın agrega

ve asfalt bağlayıcı arasındaki adezyon ve karışımın kohezyon kuvveti üzerinde olumlu bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir.

4.9.3 Dolaylı çekme mukavemeti (ITS) deney sonuçları

AASHTO T283 standardına göre uygulanan ITS deneyinde, saf ve SK katkı karışımların nem hasarına karşı dayanımları ve çekme oranları tespit edilmektedir. ITS deneyi için bir karışım türünde toplam 6 numune hazırlanmıştır. Üç numuneye vakum uygulanarak boşluk oranlarının %70-%80'nin suyla doldurulması sağlanmıştır. Vakumdan çıkarılan numune hemen streç film ile sarılarak -18°C sıcaklıktaki dondurucuda 16 saat bekletilmiştir. Numunelere vakum uygulanması Şekil 4.37(a)'da, streç film ile sarılması ise Şekil 4.37 (b)'de gösterilmiştir.

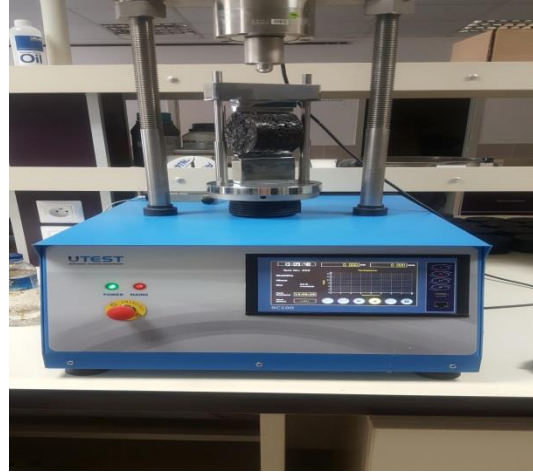


Şekil 4.37 : Numunelere vakum uygulanması (a), Streç film ile sarılması (b).

Dondurucudan çıkarılan numuneler 60°C sıcaklıktaki su banyosunda 24 saat bekletilmiştir. Su banyosundan çıkarılan numuneler son olarak 25°C sıcaklıktaki su banyosunda 2 saat bekletildikten sonra Marshall cihazında kırılmıştır. Çalışmada bu numuneler 'Şartlandırılmış' olarak adlandırılmıştır. 60°C su banyosunda bekletilen numuneler Şekil 4.38(a)'da, numunelerin kırılması ise Şekil 4.38 (b)'de gösterilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 4.38 : Numunelerin 60°C su banyosunda bekletilmesi (a),
Numunenin kırılması (b).

‘Şartlandırılmamış’ numuneler ise sadece 25 °C sıcaklıktaki su banyosunda 2 saat bekletildikten sonra kırılmıştır. Kırma işlemi süresince tüm numuneler üzerinde 50.8 mm/dk’lık sabit yükleme uygulanmıştır.

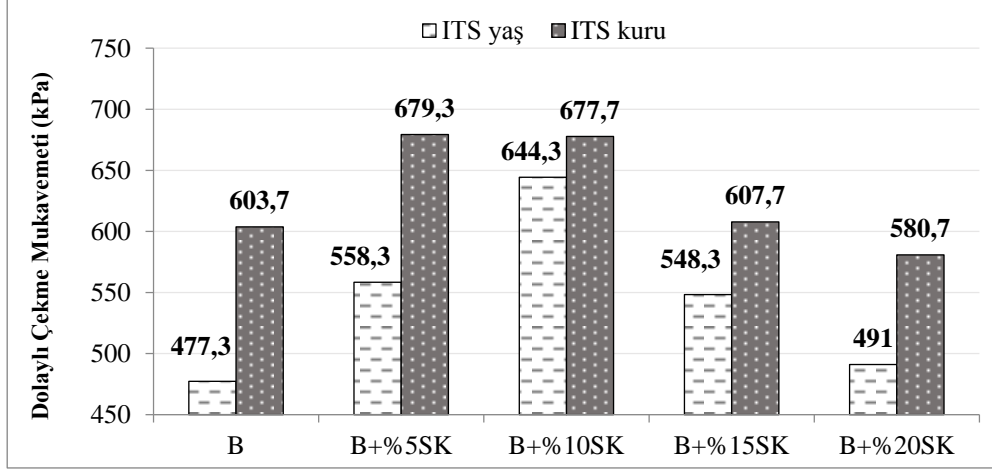
ITS deneyine tabi tutulan şartlandırılmış numunelerin dolaylı çekme mukavemetleri $ITS_{yaş}$, şartlandırılmamış numunelerin dolaylı çekme mukavemetleri ITS_{kuru} olarak adlandırılmıştır. Nem hassasiyetinin bir ölçüsü olan dolaylı çekme mukavemeti oranı (ITSR) formül (4.17) ile hesaplanmıştır.

$$ITSR = (ITS_{yaş}) / (ITS_{kuru}) \quad (4.17)$$

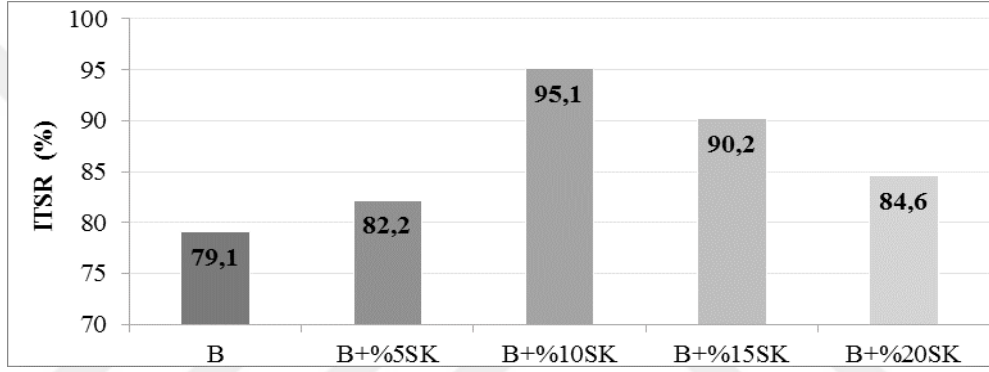
Elde edilen tüm sonuçlar Çizelge 4.23’de, Katkı oranının değişimi ile elde edilen ITS değerleri Şekil 4.39’da, karışımların ITSR değerlerinin katkı oranı ile değişimi ise Şekil 4.40’de verilmiştir.

Çizelge 4.23 : Saf ve SK katkılı karışımların ITS ve ITSR değerleri.

Karışım Türü	Numune No	Şartlandırılmış			Şartlandırılmamış			ITSR (%)
		Yükseklik (mm)	P _{maks} (kN)	ITS _{yaş} (kPa)	Yükseklik (mm)	P _{maks} (kN)	ITS _{kuru} (kPa)	
B	1	68,39	5,54	494	69,47	7,08	613	79,1
	2	68,02	5,49	481	68,87	6,36	560	
	3	70,23	5,38	457	69,04	7,28	638	
	Ortalama			477,3			603,7	
B+%5 SK	1	70,1	6,82	581	69,24	7,30	636	82,2
	2	69,3	6,05	526	69,6	8,09	699	
	3	69,0	6,48	568	69,11	8,04	703	
	Ortalama			558,3			679,3	
B+%10 SK	1	69,19	7,58	661	70,25	7,68	652	95,1
	2	69,5	6,81	590	69,7	7,5	645	
	3	69,37	7,86	682	69,57	8,52	736	
	Ortalama			644,3			677,7	
B+%15 SK	1	69,94	6,72	575	70,17	7,73	658	90,2
	2	70,5	6,27	529	70,2	6,56	557	
	3	70,72	6,45	541	71,16	7,33	608	
	Ortalama			548,3			607,7	
B+%20 SK	1	70,81	5,42	454	70,55	7,59	639	84,6
	2	70,8	5,72	479	70,9	6,01	501	
	3	70,86	6,46	540	70,49	7,13	602	
	Ortalama			491			580,7	



Şekil 4.39 : Karışımların ITS değerlerinin katkı oranı ile değişimi.



Şekil 4.40 : Karışımların ITSR değerlerinin katkı oranı ile değişimi.

Çizelge 4.23 ve Şekil 4.39 incelendiğinde, SK katkı oranı artışıyla, saf karışım numunesine kıyasla, dolaylı çekme mukavemet değerleri ITSyaş karışım numunelerinde sırasıyla %17; %35; %14,9 ve %2,9 artış, ITSkuru karışım numunelerinde ise sırasıyla %12,5; %12,2; %0,6 artış ve %3,8 azalma şeklindedir. Saf ve SK katkılı karışımların ITSR değerleri incelendiğinde (Şekil 4.40), karışımlarda SK katkı oranı artışıyla karışımların ITSR değerlerinde sırasıyla %3,9; %20,2; %14 ve %7 artış görülmüştür. Karışım numunelerinde, en yüksek ITSR değeri ise %10SK katkılı karışımda görülmüştür. Elde edilen bu sonuçlara göre, karışım numunelerinin ITSR değerlerinin %80'in üzerinde olması, karışımların nem hasarına karşı direncinin yüksek olduğunu göstermektedir. Ayrıca SK katkılı karışımların sudan kaynaklanan bozulmalara karşı direncinin yüksek olduğunu ifade etmek mümkündür.

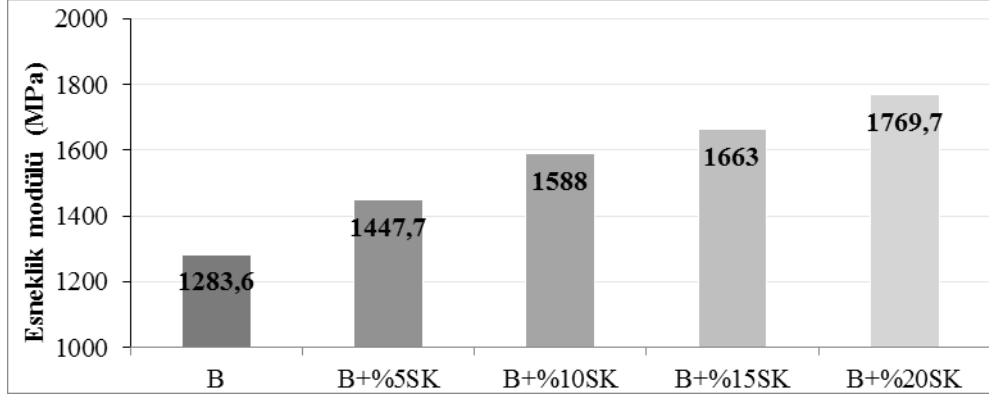
Elde edilen tüm sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde, SK katkılı bağlayıcıların seçilen bir agrega ile hazırlanmış olan karışımların iyi adezyon ve kohezyona sahip olduğu söylenebilir.

4.9.4 ITSM deney sonuçları

ITSM deneyi, UTM deney cihazı ile BS D 213 standardına göre, saf ve SK katkılı karışımlar üzerinde uygulanmıştır. Karışım numuneleri üzerinde ilk olarak 5 adet ön yükleme, daha sonra 5 defa deney yüklemesi yapılarak karışımların dinamik yükler karşısındaki rijitlikleri belirlenmiştir. Deneyde ortam sıcaklığı 25 °C, yük periyodu 3000 ms, yük artış süresi 124 ms, poisson oranı 0,35, hedef deformasyon ise 5 µm olarak belirlenmiştir. Deney cihazında yatay ekseninde 5 µm deformasyon meydana getirecek yük otomatik olarak belirlenmektedir. Numuneye uygulanan 5 vuruş sonucunda ITSM değerleri bilgisayarda otomatik olarak elde edilmektedir. Elde edilen sonuçlar Çizelge 4.24’de verilmiştir. Katkı oranının değişimi ile elde edilen ITSM değerleri Şekil 4.41’de verilmiştir.

Çizelge 4.24 : Karışımların ITSM deney sonuçları.

Karışım Türü	Numune no	Yükseklik (mm)	ITSM (Mpa)	Ortalama
B	1	70,5	1325	1283,6
	2	70,3	1216	
	3	70,3	1310	
B+%5 SK	1	66,3	1557	1447,7
	2	67,1	1344	
	3	66,8	1442	
B+%10 SK	1	68	1615	1588
	2	67,8	1553	
	3	68,3	1596	
B+%15 SK	1	68,3	1650	1663
	2	68,5	1654	
	3	68,2	1685	
B+%20 SK	1	69,3	1777	1769,7
	2	68,5	1782	
	3	69,1	1750	

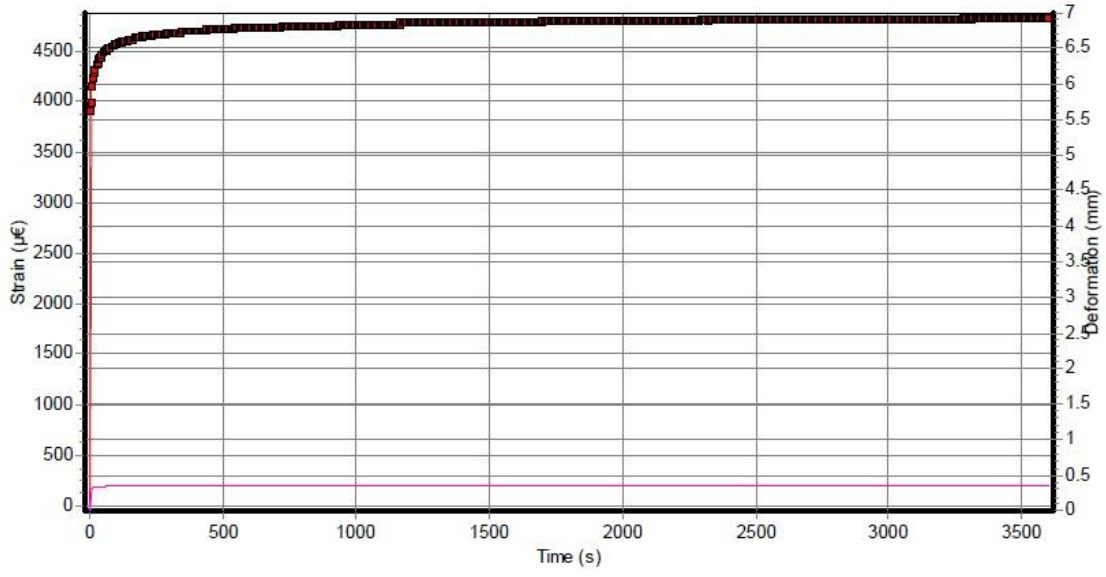


Şekil 4.41 : Katkı oranının ile değişimi ITSM değerleri.

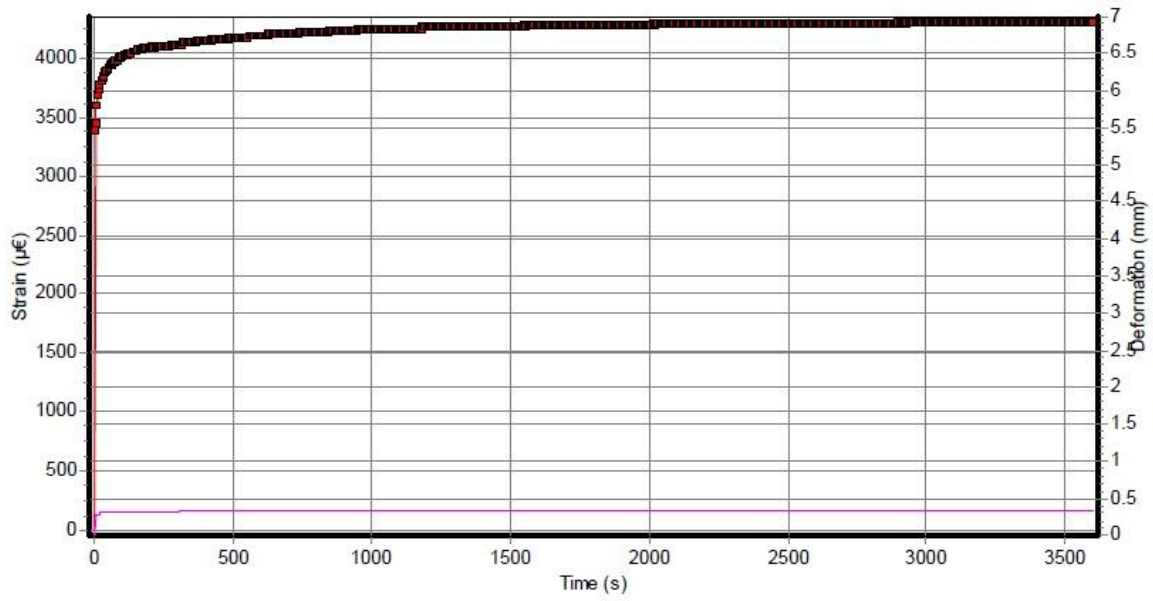
Şekil 4.41 incelendiğinde, artan SK katkı oranıyla (%5, 10, 15 ve 20) saf bitümlü karışım numunesine kıyasla ITSM değerleri sırasıyla %12,8; %23,7; %29,6 ve %37,9 oranında artış göstermiştir. Elde edilen bu sonuçlara göre, SK katkısı ile karışımların sertliğinde büyük artışların meydana geldiği ifade edilebilir. En yüksek ITSM değeri %20 SK katkılı karışımda görülmüştür. ITSM değerlerindeki bu artış, SK katkılı karışımların kalıcı deformasyonlara karşı direncinin arttığını göstermektedir.

4.9.5 Sünme deney sonuçları

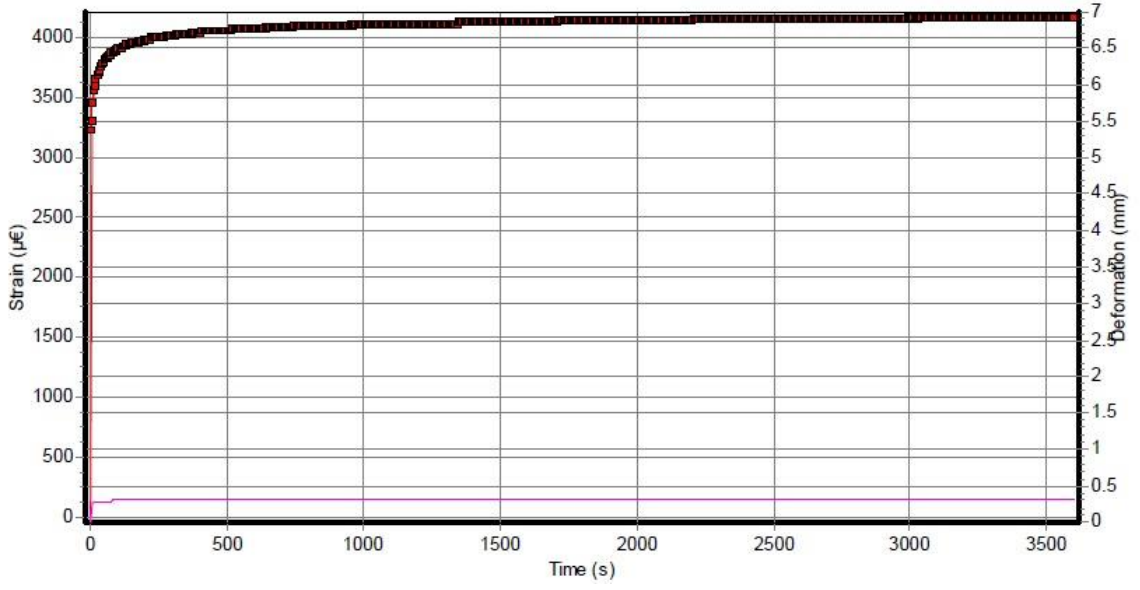
Saf ve SK katkılı karışımlar üzerinde uygulanan sünme deneyi UTM cihazıyla, EN12697-25 standardına göre 50 °C sıcaklıkta gerçekleştirilmiştir. Karışım numuneleri deneye başlamadan önce 3 saat boyunca deney sıcaklığında şartlandırılmıştır. Şartlandırma bitiminde numune üzerinde 10 dakika boyunca 20 kPa gerilme oluşturacak şekilde ön yükleme yapılmıştır. Daha sonra sensörlerde meydana gelen değişim, bilgisayar tarafından otomatik olarak sıfırlanarak gerilme değeri 200 kPa'a çıkartılmış ve deney için 1 saat boyunca yükleme yapılmıştır. Deney süresince, cihaz yazılımı her 4 saniyede bir düşey deformasyonları kaydederek sünme sertliği değerini otomatik olarak hesaplayarak sonuçları vermektedir. Numunelerin toplam birim şekil değiştirme – zaman – deformasyon sonuçları Şekil 4.42-46'da verilmiştir.



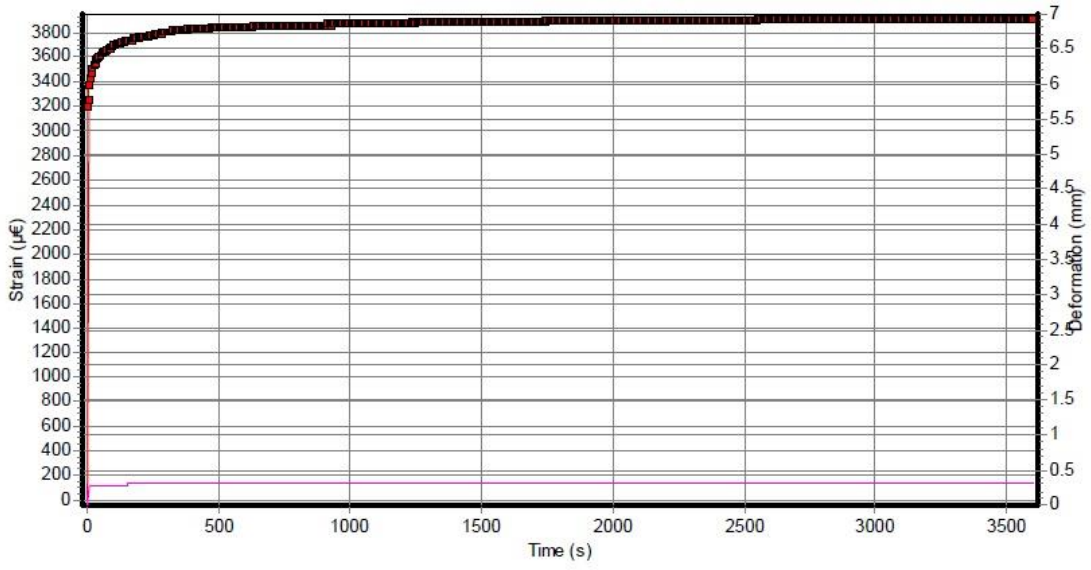
Şekil 4.42 : Saf (B) karışım numunesinin toplam birim şekil değiştirme – zaman-deformasyon grafiği.



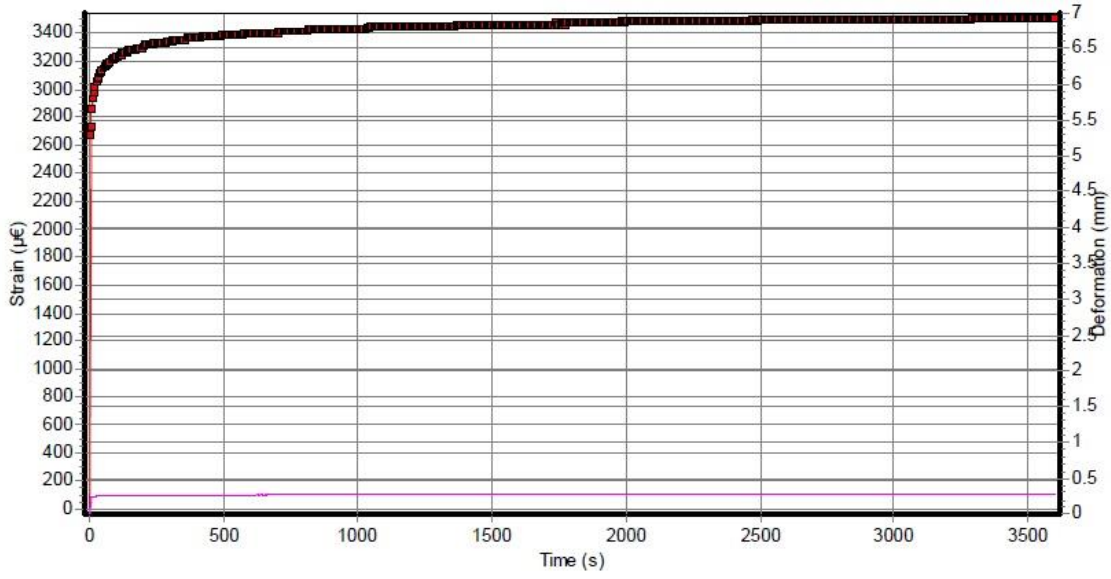
Şekil 4.43 : B+%5SK numunesinin toplam birim şekil değiştirme - zaman - deformasyon grafiği.



Şekil 4.44 : B+%10 SK numunesinin toplam birim şekil değiştirme - zaman-deformasyon grafiği.

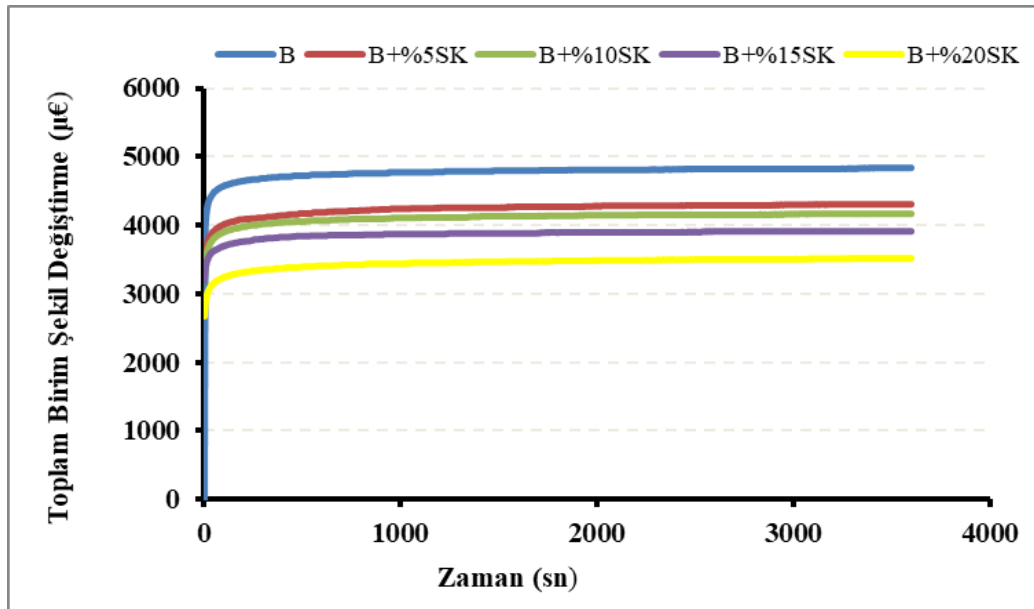


Şekil 4.45 : B+%15 SK karışım numunesinin toplam birim şekil değiştirme - zaman-deformasyon grafiği.



Şekil 4.46 : B+%20 SK karışım numunesinin toplam birim şekil değiştirme - zaman - deformasyon grafiği.

Saf ve SK katkıli karışım numunelerinin toplam birim şekil değiştirme- zaman-deformasyon grafikleri incelendiğinde SK katkısıyla numunelerin sabit yükleme altında daha az deformasyon yaptığı görülmektedir. Tüm numunelere ait toplam birim şekil değiştirme - zaman grafiği Şekil 4.47’de verilmiştir.



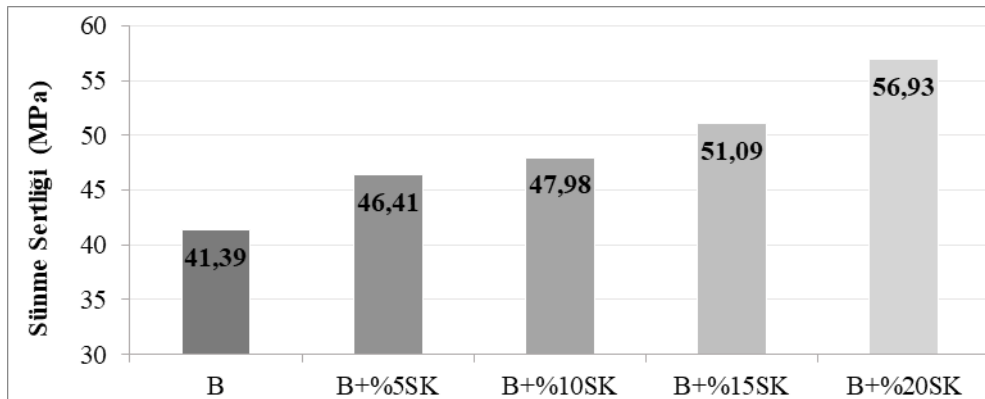
Şekil 4.47 : Numunelerin toplam birim şekil değiştirme- zaman grafiği.

Şekil 4.47 incelediğinde SK katkısı ile hazırlanan numunelerin, saf numuneye göre, toplam birim şekil değiştirme değerlerinin azaldığı ve daha az deformasyon yapacak şekilde sünme özellikleri gösterdiği görülmektedir.

Karışım numunelerinin sünme sertliği modülü (R_m) değerleri Çizelge 4.25’de gösterilmektedir. Numunelerin sünme değerlerinin katkı oranı ile değişimi Şekil 4.48’de verilmiştir.

Çizelge 4.25 : Karışım numunelerinin R_m değerleri.

Karışım Türü	Numune No	Yükseklik (mm)	Sünme Sertliği (Rm)	Ortalama Rm (Mpa)
B	1	70,5	41,48	41,39
	2	70,3	39,15	
	3	70,3	43,54	
B+%5 SK	1	66,3	47,03	46,41
	2	67,1	45,32	
	3	66,8	46,88	
B+%10 SK	1	68	48,3	47,98
	2	67,8	48,96	
	3	68,3	46,68	
B+%15 SK	1	68,3	48,25	51,09
	2	68,5	53,9	
	3	68,2	51,12	
B+%20 SK	1	69,3	58,82	56,93
	2	68,5	56,85	
	3	69,1	55,12	



Şekil 4.48 : Katkı oranının değişimi ile sünme değerleri.

Şekil 4.48 incelendiğinde, SK katkılı karışım numunelerinin saf karışım numunesine göre daha yüksek sünme sertliği değerine sahip olduğu görülmektedir. Artan SK oranına göre (%5, 10, 15 ve 20) sünme sertliği değerleri saf karışıma kıyasla sırasıyla %12,1; %15,9; %23,4 ve % 37,5 şeklindedir. Bu durumda, en yüksek sünme sertliği değerine %20 SK katkılı karışım numunesinde ulaşılmıştır. Artan katkı oranıyla birlikte SK katkılı karışımların sünme sertliği değerlerinin yüksek çıkması, yüksek sıcaklıklarda karışımın tekerlek izi deformasyonuna karşı direncinin arttığını ifade etmektedir.



5. SONUÇ

Bu tez çalışmasında, atık lastiklerden piroliz işlemi yoluyla elde edilmiş olan siyah karbon (SK)'un bitüm ve bitümlü sıcak karışımların özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir:

1. Saf bağlayıcıya SK katkısının eklenmesiyle penetrasyon değerlerinin düzenli olarak azaldığı, yumuşama noktası değerlerinin ise düzenli olarak artış gösterdiği görülmüştür. Bağlayıcıların PI değerleri incelendiğinde, %15 SK katkılı bağlayıcının sıcaklığa karşı duyarlılığın en az olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca RTFOT deneyi ile yaşlandırılmış bağlayıcılar üzerinde uygulanan penetrasyon ve yumuşama noktası deneyleri değerlendirildiğinde, bağlayıcıların yaşlanma etkisiyle daha da sertleştiği ve yumuşama noktası değerlerinin arttığı görülmüştür.

2. RV sonuçlarına göre, SK katkılı bağlayıcıların saf bağlayıcıya kıyasla karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarında artışlar meydana geldiği görülmüştür.

3. DSR sonuçlarına göre, SK katkısının bağlayıcıların yüksek sıcaklık performansı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu, % 10 SK katkısıyla saf bağlayıcının performans sınıfı 6 °C yükselmiş olup PG 58-Y'den PG 64-Y'ye ulaşılmıştır. SK katkısının bağlayıcıların yüksek sıcaklıklardaki kalıcı deformasyon direncini arttırdığı görülmüştür.

4. BBR sonuçlarına göre, %15 SK katkısıyla bağlayıcıların düşük sıcaklık performans derecesi -6 °C düşmüş olup PGX-12' den PGX-18' e ulaşmıştır. Bu sonuç SK katkısıyla bağlayıcıların düşük sıcaklıklardaki termal çatlamalara karşı direncinin arttığını göstermektedir.

5. Marshall stabilite deney sonuçlarına göre, en yüksek stabilite değerine %10 SK katkılı karışım numunesinde ulaşılmıştır. Bu, SK katkılı BSK kaplamaların trafik yüklerine karşı daha dirençli olduğunu göstermektedir.

6. MQ sonuçlarına göre, katkı oranının artışıyla özellikle %10 SK katkıli karışımlarda önemli artış meydana gelmiştir. Buna göre saf karışıma göre %10 SK katkıli karışımların kayma gerilmelerine karşı en yüksek direnci göstereceği ifade edilebilir.

7. RMS deney sonuçlarına göre, SK katkısının genel olarak nem hasarı dayanımını arttırdığını söylemek mümkündür. Nem hasarı dayanımının en yüksek olduğu karışımın %10 SK katkıli karışım olduğu görülmüştür. Bu sonuç SK' nın asfalt bağlayıcı ile agrega arasındaki adezyon kuvveti üzerinde olumlu bir etkiye sahip olduğunu ve bu sebeple nem hasarı direncinde ciddi bir artışa sebep olduğunu göstermektedir.

8. ITS ve AASHTO T283 deney sonuçlarına göre en yüksek ITSR değeri %10 SK katkıli karışımda görülmüştür. Bu durumda SK katkıli karışımların yeterli adezyon ve kohezyona sahip olduğu ve nem hasarına karşı dirençli olduğu söylenebilir.

9. ITSM deney sonuçlarına göre, SK katkısıyla rijitlik modülü en yüksek karışımın %20 SK katkıli karışımlar olduğu ve bu karışımların kalıcı deformasyonlara karşı daha dirençli olduğu ifade edilebilir.

10. Statik sünme deney sonucuna göre, SK katkıli karışım numunelerinin saf karışım numunesine göre sünme sertliği değerlerinin büyük oranda arttığı ve en yüksek değerlerin %20 SK katkıli karışım numunesinde olduğu görülmüştür. Bu durumda, SK katkıli karışımların tekerlek izi deformasyonlarına karşı oldukça dirençli olduğunu söylenebilir.

Sonuç olarak, özellikle %10-15 oranında atık SK katkısının bitüm modifikasyonunda kullanılmasının bağlayıcıların fiziksel ve reolojik özelliklerini, iyileştirdiği görülmüştür. Ayrıca SK' nın sıcak karışımlarda kullanımının kaplamaların birçok performans özelliği üzerinde iyileştirmeler sağlayacağı görülmüştür. SK' nın karayolu mühendisliğinde bir katkı malzemesi olarak kullanımının çevre zararı ve kirliliğini en aza indirebileceği ve ayrıca ülke ekonomisine büyük bir katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] **Geçkil, T.** (2008). Siyah Karbonun Bitümlü Sıcak Karışımların Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi (Doktora tezi). Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [2] **Bilim etiği.** (t.y.). Erişim: 07 Kasım 2020, <http://www.lasder.org.tr/otl/>
- [3] **Gönüllü, M.T. ,** (2004). Endüstriyel Kirlenme Kontrolü, Cilt:1, Birsen Yayınevi, 466s.,
- [4] **İnce, C.B.** (2019). Geri Kazanılmış Polietilen Tereftalat (Pet)'in Bitüm Ve Bitümlü Sıcak Karışımların Özelliklerine Etkisinin Araştırılması (Yüksek Lisans Tezi). İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya.
- [5] **Tunç, A.** (2004). Esnek Kaplama Malzemeleri El Kitabı, Asil Yayın Dağıtım, İstanbul, 352s.
- [6] **Seloğlu, M.** (2015). Reaktif Terpolimerin Bitümlü Sıcak Karışım Üzerindeki Etkisinin Araştırılması (Yüksek Lisans Tezi). İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya.
- [7] **Tunç, A.** (2007). Yol Malzemeleri ve Uygulamaları, Nobel Yayın Dağıtım, İstanbul, 840s.
- [8] **Anonim** (2001). Asfalt ve Uygulamaları, İSFALT Bilimsel Yayınları, İstanbul, 280s.
- [9] **Anonim** (2002). Asfalt El Kitabı, İSFALT Bilimsel Yayınları, İstanbul, 573s.
- [10] **Orhan, F.** (2012). Bitümlü Karışımlar Laboratuvarı Çalışmaları, Karayolları Genel Müdürlüğü, Ankara, 39s.
- [11] **Anonim** (2001). Asfalt ve Uygulamaları, İSFALT Bilimsel Yayınları, İstanbul, 280s.
- [12] **KTŞ** (2013). Karayolu Teknik Şartnamesi, Karayolları Genel Müdürlüğü, Ankara
- [13] **Yelken, F.** (2009). Belen-Topboğazı (Hatay) Arası Yol Yapım Çalışmaları (Yüksek Lisans Tezi). Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- [14] **Ünlü, F.** (2019). İstanbul'da kazınmış asfalt kaplamaların binder tabakasında yeniden kullanılabilirliğinin araştırılması (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [15] **Zaniewski, J. P., & Pumphrey, M. E.** (2004). Evaluation of performance graded asphalt binder equipment and testing protocol. Asphalt technology program, 107, 376-384.

- [16] **Kennedy, T. W., Huber, G. A., Harrigan, E. T., Cominsky, R. J., Hughes, C. S., Von Quintus, H., & Moulthrop, J. S.** (1994). Superior performing asphalt pavements (Superpave): The product of the SHRP asphalt research program.
- [17] **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, 184p.
- [18] **Alataş, T & Kizirgil, M.** (2012). Saf ve polimer modifiyeli bitümlü bağlayıcıların karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarının dönel viskozimetre deneyi ile belirlenmesi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 28(3):249-256, Kayseri.
- [19] **Yılmaz, M.** (2011). Asfaltitin Bitümlü Sıcak Karışımların Mekanik Özellikleri Üzerindeki Etkisinin Araştırılması (Doktora tezi). Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [20] **McGennis, R.B., Shuler, S. and Bahia, H.U.** (1994). Background of Superpave Asphalt Binder Test Methods, U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration, FHWA-SA-94-069, Washington DC,104 p.
- [21] **Whiteoak, D.** (2004). Shell Bitüm El Kitabı, İSFALT Bilimsel Yayınları, İstanbul, 334s..
- [22] **Önal, M.A. & Kahramangil, M.** (2013). Bitümlü Karışımlar Laboratuvar El Kitabı, Karayolları Genel Müdürlüğü, Ankara, 200s.
- [23] **Yamaç, Ö.E.** (2015). Stiren-Butadien-Stiren Ve Gilsonit'in Birlikte Kullanımının Bitümlü Sıcak Karışımların Mekanik Özellikleri Üzerindeki Etkileri (Yüksek Lisans tezi). Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [24] **Hınıslioğlu, S., & Ağar, E.** (2004). Use of waste high density polyethylene as bitumen modifier in asphalt concrete mix. Materials letters, 58(3-4), 267-271.
- [25] **Zoorob, S.E. and Suparma, L.B.** (2000). Laboratory Design and Investigation of the Properties of Continuously Graded Asphaltic Concrete Containing Recycled Plastics Aggregate Replacement (Plastiphalt), Cement & Concrete Composites, 233-242.
- [26] **Alshamsi, K.S.** (2006). Development of a Mix Design Methodology for Asphalt Mixtures with Analytically Formulated Aggregate Structures, PhD Thesis, Louisiana State University United Kingdom
- [27] **Lavin, P.G.** (2003). Asphalt Pavements, Spon Pres, London and New York, 444p.
- [28] **Ahmedzade, P., Alataş, T. and Geçkil, T.** (2007). The Effect of Carbon Black on The Mechanical Properties of Asphalt Mixtures, Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences, 25:2 179-189.
- [29] **Demirci, Y., Dere, T. ve Gönüllü, T.** (2014). Adıyaman İlinde Piroiliz Teknolojisini Kullanarak Ömrünü Tamamlamış Lastiklerden Aktif Karbon Üretimi: Fizibilite Çalışması, Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi (1) 31-41.

- [30] **Durna, E., Dere, T. ve Genç, N.** (2020). Türkiye’de Ömrünü Tamamlamış Lastiklerin Yönetiminde En Uygun Bertaraf Seçeneğinin Promethee Ve Bulanık Promethee Yöntemi İle Belirlenmesi, *Journal of Polytechnic*; 23 (4): 915-927
- [31] **Geçkil, T.** (2019). Physical, Chemical, Microstructural and Rheological Properties of Reactive Terpolymer- Modified Bitumen, *Materials*, 12;6, 921.
- [32] **Ahmedzade, P., Alataş, T. ve Geçkil, T.** (2008). Asfalt Betonunda Siyah Karbonun Filler Olarak Kullanımı, *İMO Teknik Dergi*, 4493-4507, Yazı 297
- [33] **Gürer, C. & Elmacı, A.** (2019). Karbon Siyahı Katkılı Bitümlerin Taş Mastik Asfalt Karışımlarda Elektriksel İletkenlik Özelliklerine Olan Etkisinin Araştırılması, *Journal of Innovations in Civil Engineering and Technology*, 1(2), 65-74.
- [34] **Alataş, T., Yılmaz, M., Kök, B.V., Çeloğlu, M.E., Akpolat, M., Yamaç, Ö.E. ve Yalçın, E.** (2018). Öğütülmüş Araç Lastiğinin Karbon Siyahının Bitümlü Bağlayıcıların Reolojik Özellikleri Üzerindeki Etkisi, *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, Cilt 23, Sayı 1
- [35] **Casado-Barrasa, R., Lastra-Gonzalez P., Indacoechea-Vega I. and Castro-Frenso, D.** (2019). Assessment of carbon black modified binder in a sustainable asphalt concrete mixture, *Construction and Building Materials* 211 363–370
- [36] **Wang, R., Xiong, Y., Yue, M., Hao, M. and Yue, J.** (2020). Investigating the effectiveness of carbon nanomaterials on asphalt binders from hot storage stability, thermodynamics, and mechanism perspectives, *Journal of Cleaner Production* 276, 124180
- [37] **Ameli, A., Khabbaz, E. H., Babagoli, R., Norouzi, N., & Valipourian, K.** (2020). Evaluation of the effect of carbon nano tube on water damage resistance of Stone matrix asphalt mixtures containing polyphosphoric acid and styrene butadiene rubber. *Construction and Building Materials*, 261, 119946.
- [38] **Tanzadeh, R. & Shafabakhsh, G.** (2020). Surface free energy and adhesion energy evaluation of modified bitumen with recycled carbon black (micro-nano) from gases and petrochemical waste. *Construction and Building Materials*, 245, 118361.
- [39] **Feng, Z. G., Rao, W. Y., Chen, C., Tian, B., Li, X. J., Li, P. L., & Guo, Q. L.** (2016). Performance evaluation of bitumen modified with pyrolysis carbon black made from waste tyres. *Construction and Building Materials*, 111, 495-501.
- [40] **Chaalal, A., Roy, C., & Ait-Kadi, A.** (1996). Rheological properties of bitumen modified with pyrolytic carbon black. *Fuel*, 75(13), 1575-1583.
- [41] **Jahanbakhsh, H., Karimi, M. M., Jahangiri, B., & Nejad, F. M.** (2018). Induction heating and healing of carbon black modified asphalt concrete under microwave radiation. *Construction and Building Materials*, 174, 656-666.

- [42] **Cong, P., Xu, P., & Chen, S.** (2014). Effects of carbon black on the anti aging, rheological and conductive properties of SBS/asphalt/carbon black composites. *Construction and Building Materials*, 52, 306-313.
- [43] **Satoda, H.** (2016). The recovery of carbon black from scrap rubber by a continuous dry distillation system and its use for an asphalt pavement. *Carbon*, 100(104), 263.
- [44] **Lesueur, D., Dekker, D. L., & Planche, J. P.** (1995). Comparison of carbon black from pyrolyzed tires to other fillers as asphalt rheology modifiers. *Transportation research record*, 1515, 47.
- [45] **Chebil, S., Chaala, A., & Roy, C.** (2000). Use of softwood bark charcoal as a modifier for road bitumen. *Fuel*, 79(6), 671-683.
- [46] **Button, J. W., Williams, D., & Scherocman, J. A.** (1996). Roofing shingles and toner in asphalt pavements (No. FHWA/TX-97/1344-2F).
- [47] **Terrel, R. L.** (1980). Evaluation of wood lignin as a substitute or extender of asphalt.
- [48] **Çabuk, A.** (2001). Asfaltta Bozulmalar ve Onarım Yöntemleri, (powerpint sunumu) İsfalt, İstanbul
- [49] **Jennings, P. W., Pribanic, J. A. S., Smith, J., Mendes, T. M., Pribanic, J. A., Smith, J., & Mendes, T. M.** (1988). Predicting the performance of Montana test sections by physical and chemical testing. *Transportation Research Record*, (1171).

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Zülfükar AKSAĞAN

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2011, Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü

MESLEKİ DENEYİM:

- 2011-2014 özel sektörde çalıştı
- 2014-2017 Elazığ Belediyesinde çalıştı
- 2017' den itibaren Munzur Üniversitesinde öğretim görevlisi olarak çalışmakta.

YÜKSEK LİSANS TEZİNDEN TÜRETİLEN ÇALIŞMALAR (Makaleler, Bildiriler, Patentler v.b.)

1. Geçkil T, Aksağan Z, İnce CB. Atık Lastiklerden Elde Edilen Siyah Karbonun Bitümün Kıvamına ve Sıcaklık Hassasiyetine Etkisi (1-11), *Balkan Zirvesi 3. Uluslararası Uygulamalı Bilimler Kongresi*, 28-29 Kasım, Edirne, (2020).