

T.C.
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

NANOSİLİKA’NIN BİTÜM VE BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIMLARIN
ÖZELLİKLERİNE ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

EDA TÜZÜN ÖZPINAR

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

EKİM 2019

Tezin Başlığı: Nanosilika'nın Bitüm ve Bitümlü Sıcak Karışımların Özelliklerine Etkisinin Araştırılması

Tezi Hazırlayan: Eda TÜZÜN ÖZPINAR

Sınav Tarihi: 17.10.2019

Yukarıda adı geçen tez jürimizce değerlendirilerek İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Sınav Jürisi Üyeleri (ilk isim tez danışmanı, ikinci isim jüri başkanı)

Tez Danışmanı: **Doç.Dr.Tacettin GEÇKİL**

İnönü Üniversitesi

Prof. Dr. Mehmet YILMAZ

Fırat Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Yaşar AYAZ

İnönü Üniversitesi

Prof. Dr. Kazım TÜRK

Enstitü Müdürü



Canım Babam Ahmet Tüzün'e

ONUR SÖZÜ

Yüksek lisans tezi olarak sunduğum ‘Nanosilika’nın Bitüm ve Bitümlü Sıcak Karışımların Özelliklerine Etkisinin Araştırılması’ başlıklı bu çalışmanın bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma gerek kalmaksızın tarafımdan yazıldığını ve yararlandığım bütün kaynakların, hem metin içinde, hem de kaynakçada yöntemine uygun bir şekilde gösterilenlerden oluştuğunu belirtir, bunu onurumla doğrularım.

Eda TÜZÜN ÖZPINAR

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

NANOSİLİKA'NIN BİTÜM VE BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIMLARIN ÖZELLİKLERİNE ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

EDA TÜZÜN ÖZPINAR

İnönü Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

110 + xii sayfa

2019

Danışman: Doç. Dr. Tacettin GEÇKİL

Bu çalışmada bir katkı maddesi olarak nanosilikanın bitüm ve bitümlü sıcak (BSK) karışımların performansı üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

Bu amaçla, çalışmalar için B 160/220 penetrasyon sınıfına giren bitüme ağırlıkça %1, %3, %5 ve %7 oranlarında nanosilika eklenerek modifiye bitümler elde edilmiştir. Saf ve modifiye bitümlerin fiziksel özellikleri penetrasyon, yumuşama noktası, duktilite deneyi gibi geleneksel deneylerle, reolojik özellikleri ise kiriş eğme reometresi (BBR), dönel viskozimetre (RV), dinamik kesme reometresi (DSR) deneyleriyle belirlenmiştir. Bu bağlayıcıların BSK kaplamaların performans özellikleri üzerindeki etkileri tespit etmek amacıyla Marshall dizayn yöntemi kullanılarak karışım numuneleri hazırlanmıştır. Bu karışım numuneleri üzerinde Marshall stabilitesi ve akma, kalıcı Marshall stabilitesi, nem hassasiyeti, dolaylı çekme rijitlik modülü (ITSM) ve statik sünme deneyleri yapılmıştır.

DeneySEL çalışmalar sonucunda nanosilika ilavesiyle bitümlü bağlayıcıların belli bir orana kadar sertleştiği ancak daha sonra yumuşamaya başladığı, yine sıcaklık hassasiyetinin azalarak sonra artış gösterdiği bulunmuştur. Ayrıca karışım numunelerinin stabilite, nem hasarı ve tekerlek izi dirençlerinde artışlar meydana geldiği görülmüştür.

ANAHTAR KELİMELEER: Asfalt, Agrega, Nanosilika, Modifikasyon, Bitüm Modifikasyonu, Marshall Stabilitesi

ABSTRACT

Master of Science Thesis

INVESTIGATION OF THE EFFECT NANOSİLİCA ON PROPERTIES OF BITUMEN AND HOT MIX BITUMINOUS

EDA TÜZÜN ÖZPINAR

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

110 + xii pages

2019

Supervisor: Doç. Dr. Tacettin GEÇKİL

In this study, the effect of nanosilicate as an additive on the performance of bitumen and bituminous hot (BSK) mixtures was investigated.

For this purpose, modified bitumen was obtained by adding 1%, 3%, 5% and 7% by weight nanosilica to the B 160/220 penetration class. Physical properties of pure and modified bitumen were determined by conventional tests such as penetration, softening point, ductility test, and rheological properties were determined by beam bending rheometer (BBR), rotational viscometer (RV), dynamic shear rheometer (DSR) tests. Mixture samples were prepared using Marshall design method in order to determine the effects of these binders on the performance characteristics of BSK coatings. Marshall stability and yield, permanent Marshall stability, moisture sensitivity, indirect tensile stiffness modulus (ITSM) and static creep tests were performed on these mixture samples.

As a result of experimental studies, it was found that bituminous binders harden up to a certain rate with the addition of nanosilica, but then began to soften, and again the temperature sensitivity decreased and then increased. In addition, it has been observed that the stability, moisture damage and the resistance of the wheel tracks have increased.

KEYWORDS: Asphalt, Agregate, Nanosilica, Modification, Modified Bitumen, Marshall Stability

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının konu tespitini gerçekleştiren ve çalışmanın her aşamasında tecrübelerinden yararlandığım, yardım, öneri ve desteğini esirgemeyerek tez çalışmamı tamamlamamı sağlayan danışman hocam Sayın Doç. Dr. Tacettin GEÇKİL'e;

Fırat Üniversitesi ulaştırma laboratuvarını kullanmamızı sağlayan ve çalışmalarımızda yardımcı olan hocam Prof. Dr. Mehmet YILMAZ 'a

Çalışmalarımın her safhasında yardımcı olan beraber çalıştığım arkadaşım Sayın İnş. Müh. Semih İSSİ' ye,

Laboratuvar çalışmalarımıza yardımcı olan teknisyenimiz Sayın İlhami BAYSAL'a teşekkür ederim.

Çalışmalarım süresince ihmal etmek zorunda kaldığım ancak hep desteklerini gördüğüm sevgili eşim ve kızıma, bugüne kadar hayatımın her döneminde olduğu gibi yüksek lisans eğitimim süresince de maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen aileme, özellikle kıymetli annem ve babama teşekkür ederim. En büyük minnettarlığım da tez süreci içerisinde kaybettiğim benim en büyük dayanağım koca yürekli canım babama...Çok büyük özlem ve rahmetle tezimi babama armağan ediyorum, mekanı cennet olsun.

Ayrıca, bu çalışma İnönü Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi, **İÜ-BAP FYL 2016/99** numaralı projesi ile desteklenmiştir. Desteklerinden dolayı İnönü Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi'ne teşekkür ederim.

Eda TÜZÜN ÖZPINAR

Malatya-2019

İÇİNDEKİLER

	ÖZET.....	i
	ABSTRACT.....	ii
	TEŞEKKÜR.....	iii
	İÇİNDEKİLER.....	iv
	SİMGELER VE KISALTMALAR.....	vii
	ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ix
	ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xii
1.	GİRİŞ.....	1
2.	BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIMLAR (BSK).....	3
2.1.	Bitümlü Sıcak Karışımlarda Kullanılan Agregalar.....	4
2.1.1.	Agregaların Fiziksel Özellikleri.....	4
2.1.2.	Agregalara Uygulanan Deneyler.....	6
2.2.	Bitümlü Sıcak Karışımlarda Kullanılan Bağlayıcılar.....	6
2.2.1.	Asfaltın Kimyasal Yapısı.....	8
2.2.2.	Asfaltın Reolojik Davranışı.....	9
2.3.	Asfalt Bağlayıcılara Uygulanan Geleneksel Deneyler.....	10
2.3.1.	Penetrasyon Deneyi (TS 118, TS EN 1426, ASTM D5).....	11
2.3.2.	Yumuşama Noktası Deneyi (TS 120, TS EN 1427, ASTM D36)	12
2.3.3.	Düktilite Deneyi (TS 119, TS EN 12589)	12
2.3.4.	Parlama Noktası Deneyi.....	13
2.3.5.	Özgül Ağırlık Deneyi (TS 1087)	13
2.4.	Superpave Asfalt Bağlayıcı Deneyleri.....	14
2.4.1.	Dönel İnce Film Halinde Isıtma Kaybı Deneyi (RTFOT).....	18
2.4.2.	Basınçlı Yaşlandırma Kabı (PAV) Deneyi (AASHTO PP1)..	18
2.4.3.	Dönel Viskozimetre Deneyi (RV)	19
2.4.4.	Kiriş Eğme Reometresi (BBR)	20
2.4.5.	Dinamik Kesme Reometresi (DSR)	22
2.4.6.	Doğrudan Çekme Deneyi (DDT)	25
2.5.	Bitümlü Sıcak Karışımlara Uygulanan Performans Deneyleri.....	25
2.5.1.	Marshall Stabilite ve Akma Deneyi.....	26
2.5.2.	Dolaylı Çekme Mukavemeti (ITS) Deneyi.....	27
2.5.3.	Modifiye Lottman (AASHTO T-283) Deneyi.....	28
2.5.4.	Dolaylı Çekme Esneklik Modülü (ITSM) Deneyi.....	30
2.5.5.	Kalıcı Marshall Stabilitesi (Retained Marshall) (RMS).....	32
2.5.6.	Statik Yüklemeli Sünme Modülü Deneyi.....	32
2.6.	Bitümlü Sıcak Karışımlardan Beklenen Özellikler.....	33
2.6.1.	Bitümlü Sıcak Karışımların Stabilitesi.....	33
2.6.2.	Bitümlü Sıcak Karışımların Durabilitesi.....	34
2.6.3.	Bitümlü Sıcak Karışımların Geçirimsizliği.....	34

2.6.4.	Bitümlü Sıcak Karışımların İşlenebilirliği.....	34
2.6.5.	Bitümlü Sıcak Karışımların Esnekliği.....	35
2.6.6.	Bitümlü Sıcak Karışımların Yorulmaya Karşı Direnci.....	35
2.6.7.	Bitümlü Sıcak Karışımların Kaymaya Karşı Direnci.....	35
2.7.	Bitümlü Sıcak Karışımlarda Meydana Gelen Bozulmalar....	37
2.7.1.	Deformasyonlar.....	37
2.7.1.1.	Tekerlek izi oluşumu.....	37
2.7.1.2.	Oturmalar ve çökmeler.....	38
2.7.1.3.	Ondülasyonlar ve kabarmalar.....	38
2.7.2.	Çatlamalar.....	39
2.7.2.1.	Yorulma Çatlakları.....	39
2.7.2.2.	Düşük Sıcaklık Çatlakları.....	40
2.7.3.	Kusma.....	40
2.7.4.	Ayrışmalar.....	41
2.7.4.1.	Dağılmalar ve sökülmeler.....	41
2.7.4.2.	Soyulma.....	41
2.8.	Bitümlü Sıcak Karışımlarda Kullanılan Dizayn Yöntemleri...	42
3.	BİTÜM VE BİTÜMLÜ KARIŞIMLARIN	
	MODİFİKASYONU.....	43
3.1.	Modifikasyonun Amacı.....	43
3.2.	Katkı Maddelerinin Bitümlü Karışımlardaki Rolü.....	44
3.3.	Bitüm Katkı Maddelerinin Sınıflandırılması.....	45
3.4.	Nanosilika'nın Bitüm ve BSK Modifikasyonunda Kullanımı.....	49
4.	DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	53
4.1.	Bitümlü Bağlayıcı Seçilmesi.....	53
4.2.	Agrega Seçilmesi.	53
4.3.	Katkı Malzemesi Seçilmesi.....	54
4.4.	Modifiye Bitümlerin Hazırlanması.....	55
4.5.	Bağlayıcılar Üzerinde Uygulanan Deneyler ve Sonuçlar.....	56
4.5.1.	Bağlayıcıların Fiziksel Özelliklerinin Belirlenmesi.....	56
4.5.2.	Saf ve Nanosilika Modifiyeli Bağlayıcıların Yaşlandırılması..	60
4.6.	Bağlayıcıların Performans Deneyleri.....	62
4.6.1.	Dinamik Kayma Reometresi (DSR) Deneyi (AASHTO TP5)	62
4.6.2.	Kiriş Eğme Reometresi (BBR) Deneyi.....	70
4.6.3.	Dönel Viskozimetre (RV)Deneyi.....	73
4.7.	Modifiye Karışımların Hazırlanması.....	77
4.7.1.	Marshall Numunelerinin Hazırlanması.....	77
4.7.1.1.	Optimum Bitüm Yüzdesinin Bulunması.....	80
4.8.	Karışımlar Üzerinde Uygulanan Performans Deneyleri.....	86
4.8.1.	Marshall Stabilite ve Akma Deneyi.....	87
4.8.2.	Kalıcı Marshall Stabilitesi (RMS)	90
4.8.3.	Dolaylı Çekme Rijitlik Modülü (ITSM) Deneyi.....	92

4.8.4.	Dolaylı Çekme Mukavemeti (ITS) ve AASHTO T283 Sonuçları.....	94
4.8.5.	Statik Sünme Deneyi.....	98
5.	SONUÇLAR.....	104
6.	KAYNAKLAR.....	106
	ÖZGEÇMİŞ.....	110



SİMGELER VE KISALTMALAR

AASHTO	Amerika Devlet Otoyolları ve Resmi Taşımacılık
ASTM	Amerika Test ve Malzeme Kurumu
BBR	Kiriş Eğme Reometresi
BSK	Bitümlü Sıcak Karışım
Dp	Karışım numunesinin pratik özgül ağırlığı
DSR	Dinamik Kayma Reometresi
DTT	Direkt Çekme Deneyi
Gb	Bağlayıcının özgül ağırlığı
Gf	Fillerin özgül ağırlığı
Gi	İnce agreganın özgül ağırlığı
Gk	Kaba agreganın özgül ağırlığı
HMA	Sıcak Asfalt Karışım
ITSM	Dolaylı Çekme Esneklik Modülü
KGM	Karayolları Genel Müdürlüğü
Ma	Karışım içindeki agrega miktarı
Mb	Karışım içindeki bağlayıcı miktarı
MQ	Marshall katsayısı
PAV	Basınçlı Yaşlandırma Kabı
RMS	Kalıcı Marshall Stabilitesi
RTFOT	Dönel İnce Film Halinde Isıtma Deneyi
RV	Dönel Viskozimetre
SHRP	Stratejik Karayolu Araştırma Programı
SUPERPAVE	Yüksek Performanslı Asfalt Kaplama
VMA	Agregalar Arası Boşluk
Wa	Agrega içerisindeki bağlayıcı yüzdesi
Wb	Karışım içindeki bağlayıcı yüzdesi
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 _{port}	Numunelerin ortalama pratik hacim özgül ağırlığı
Dt	Numunenin Teorik Max. özgül ağırlığı
Vh	Numunedeki boşluk yüzdesi
Vb	Numunedeki efektif bitüm hacmi %'si
Va	Numunedeki agrega hacmi %'si
Vma	Agregalar arasındaki boşluk %'si
Vf	Vma'nın bitümle dolu boşluk %'si
Pbe	Agrega ağırlığına göre efektif bitüm %'si
Gsb	Agrega hacim özgül ağırlığı

Gse	Efektif özgül ağırlığı
Gsa	Agrega zahiri özgül ağırlığı
%K	Karışımındaki kaba agrega %'si
%İ	Karışımındaki ince agrega %'si
%F	Karışımındaki filler %'si
Sm	Bitümlü sıcak karışımın rijitlik (sertlik) modülü
ITS	Bitümlü sıcak karışımın dolaylı çekme dayanımı
G*	Bitümlü bağlayıcı kompleks kayma modülü
δ	Bitümlü bağlayıcı faz açısı
c	Düzeltilme katsayısı
ITS	Dolaylı çekme mukavemeti (kPa)
Pmax	Maksimum yük (kN)
h	Numune yüksekliği (mm)
d	Numune çapı (mm)
ITSR	Dolaylı çekme mukavemeti oranı (%)
ITSyaş	Şartlandırılmış (yaş) gurubun ortalama dolaylı çekme mukavemeti (kPa)
ITSkuru	Şartlandırılmamış (kuru) gurubun ortalama dolaylı çekme mukavemeti (kPa)
P	Maksimum yük (N)
Hy	Toplam yatay deformasyon (mm)
H	Numune kalınlığı (mm)
v	Poisson oranı
Vd	Düşey deformasyon (mm)
Rm	Sünme sertliği modülü (MPa)
E	Toplam kalıcı eksenel deformasyon (mm)
τ_{maks}	Maksimum kayma gerilmesi
τ_{min}	Minimum kayma gerilmesi
γ_{maks}	Maksimum kayma deformasyon

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1.	Ham Petrolün Damıtılmasıyla Elde Edilen Asfaltlar	8
Şekil 2.2.	Asfaltın Yapısı ve Bileşenleri	9
Şekil 2.3.	Bitümün Farklı Sıcaklık ve Zamana Göre Değişimi	10
Şekil 2.4.	Bitümün Sıcaklıkla Değişimi	10
Şekil 2.5.	Standart Penetrasyon Deney Aleti	11
Şekil 2.6.	Yumuşama Noktası Cihazı	12
Şekil 2.7.	Düktilite Cihazı	12
Şekil 2.8.	Parlama Noktası Cihazı	13
Şekil 2.9.	Piknometre Kabı ile Özgül Ağırlık Tayini	14
Şekil 2.10.	RTFOT Cihazı (a) ve Deney Şişeleri (b)	18
Şekil 2.11.	PAV Deney Cihazı	19
Şekil 2.12.	Brookfield Viskozimetresi ve Deney Tüpleri	20
Şekil 2.13.	Kiriş Eğme Reometresi (BBR) Deney Aleti	20
Şekil 2.14.	BBR Deneyi İçin Numune Hazırlanması (a) ve Deneyin Yapılması (b)	21
Şekil 2.15.	Sünme Oranının Belirlenmesi	21
Şekil 2.16.	Bohlin DSR II Dinamik Kesme Reometresi	22
Şekil 2.17.	Numunenin Silikon Kalıba Doldurulması (a) ve Üst Plağa Yerleştirilmesi (b)	22
Şekil 2.18.	DSR Deneyinde Numunelere Uygulanan Deformasyon Yönleri..	23
Şekil 2.19.	Asfalt Bağlayıcının Viskoelastik Özelliği	23
Şekil 2.20.	Viskoelastik Malzemelerin Gerilme-Deformasyon İlişkisi....	24
Şekil 2.21.	Marshall Stabilite ve Akma Deneyi Cihazı	26
Şekil 2.22.	ITS Deneyi Yükleme Durumu (a) ve Kırılma Düzlemi (b)...	27
Şekil 2.23.	Dolaylı Çekme Deneyi (a) ve Şematik Görünüşü (b)	30
Şekil 2.24.	ITSM Deney Cihazı	32
Şekil 2.25.	Sünme Deneyi Uygulanan Numune	33
Şekil 2.26.	Tekerlek İzi Oluşumu	38
Şekil 2.27.	Tipik Bir Esnek Üstyapısı (a) ve Oluşan Bozulmalar (b)	39
Şekil 2.28.	Kaplama Gerilme Durumu ve Düşük Sıcaklık Çatlakları	40
Şekil 3.1.	Bitümün Statik Yükler Altındaki Visko-Elastik Davranışı...	44
Şekil 3.2.	Bitümün Dinamik Yükler Altındaki Visko-Elastik Davranışı...	45
Şekil 4.1.	Karışımlarda Kullanılan Nanosilika(a) ve Karıştırma Cihazı (b)	56
Şekil 4.2.	Bağlayıcıların Penetrasyon Değişimleri	57
Şekil 4.3.	Bağlayıcıların Yumuşama Noktası Değişimleri	58
Şekil 4.4.	Bağlayıcıların Düktilite Değişimleri	59
Şekil 4.5.	Bağlayıcıların PI Değişimleri	60
Şekil 4.6.	Bağlayıcıların Kütle Kayıplarındaki Değişim	61
Şekil 4.7.	Orijinal Bağlayıcıların Kayma Modülü (G*) Değerlerinin Sıcaklıkla Değişimi	63

Şekil 4.8.	Orijinal Bağlayıcıların Faz Açılarının (δ) Sıcaklıkla Değişimi.....	63
Şekil 4.9.	Orijinal Bağlayıcıların $G^*/\sin\delta$ Değerlerinin Sıcaklıkla Değişimi.....	64
Şekil 4.10.	RTFOT Sonrası Bağlayıcıların Kayma Modülü (G^*) Değerinin Sıcaklıkla Değişimi.....	66
Şekil 4.11.	RTFOT Sonrası Bağlayıcıların Faz Açılarının (δ) Sıcaklıkla Değişimi.....	66
Şekil 4.12.	RTFOT Sonrası Bağlayıcıların $G^*/\sin \delta$ Değerlerinin Sıcaklıkla Değişimi.....	67
Şekil 4.13.	PAV kalıntısı Bağlayıcıların Kayma Modülünün (G^*) Sıcaklıkla Değişimi.....	68
Şekil 4.14.	PAV Kalıntısı Bağlayıcıların Faz Açılarının (δ) Sıcaklıkla Değişimi.....	69
Şekil 4.15.	PAV Sonrası Bağlayıcıların $G^*.\sin \delta$ Değerlerinin Sıcaklıkla Değişimi.....	70
Şekil 4.16.	Bağlayıcıların Sünme Sertliğinin Sıcaklıkla Değişimi.....	72
Şekil 4.17.	Bağlayıcıların Sünme Oranının (m-değer) Sıcaklıkla Değişimi.....	72
Şekil 4.18.	Bağlayıcıların 135°C ve 165°C Sıcaklıktaki Viskozite Değişimi.....	74
Şekil 4.19.	Bağlayıcıların Viskozite-Sıcaklık İlişkisi.....	75
Şekil 4.20.	Bağlayıcıların Karıştırma- Sıkıştırma Sıcaklık Değerleri.....	76
Şekil 4.21.	Karıştırma Cihazı.....	78
Şekil 4.22.	Marshall Tokmağı.....	79
Şekil 4.23.	Numunelerin Krikoyla Çıkarılması (a) ve Kumpasla Yüksekliğin Ölçülmesi (b)	79
Şekil 4.24.	Marshall Stabilite ve Akma Cihazı.....	80
Şekil 4.25.	Dp- Bitüm %'si	84
Şekil 4.26.	Stabilite- Bitüm %'si ilişkisi.....	84
Şekil 4.27.	Akma – Bitüm %'si	84
Şekil 4.28.	Vh- Bitüm %'si	85
Şekil 4.29.	VMA- Bitüm %'si	85
Şekil 4.30.	Vf- Bitüm %'si	85
Şekil 4.31.	Stabilitenin Katkı Miktarı ile Değişimi.....	89
Şekil 4.32.	Karışımların Akma- katkı miktarı değişimi.....	89
Şekil 4.33.	Karışımların MQ- katkı miktarı değişimi.....	90
Şekil 4.34.	RMS değerinin Katkı Oranına Göre Değişimi.....	92
Şekil 4.35.	Karışımların ITSM Değerinin Katkı Miktarı ile Değişimi	94
Şekil 4.36.	Numunelere Vakum Uygulanması (a), Streç Film ile Sarılması (b).....	95
Şekil 4.37.	Numunelerin 60°C Su Banyosunda Bekletilmesi (a) ve Kırılması (b)	95
Şekil 4.38.	Karışımların ITS Değerlerinin Katkı Oranı ile Değişimi.....	97

Şekil 4.39.	Karışımların ITSR Değerlerinin Katkı Oranı ile Değişimi...	97
Şekil 4.40.	Saf Karışım Numunesinin Toplam Birim Şekil Değiştirme-Deformasyon-Zaman Grafiği.....	98
Şekil 4.41.	B+%1N Karışım Numunesinin Toplam Birim Şekil Değiştirme-Deformasyon-Zaman Grafiği.....	99
Şekil 4.42.	B+%3N Karışım Numunesinin Toplam Birim Şekil Değiştirme-Deformasyon-Zaman Grafiği.....	99
Şekil 4.43.	B+%5N Karışım Numunesinin Toplam Birim Şekil Değiştirme-Deformasyon-Zaman Grafiği.....	100
Şekil 4.44.	B+%7N Karışım Numunesinin Toplam Birim Şekil Değiştirme-Deformasyon-Zaman Grafiği.....	100
Şekil 4.45.	Numunelerin Toplam Birim Şekil Değiştirme- Zaman Grafiği.....	101
Şekil 4.46.	Numunelerin Sünme Sertliği Modülü Değişimi.....	102

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1.	Agrega Deneyleri (Karayolları teknik şartnamesi).....	6
Çizelge 2.2.	Geleneksel Asfalt Bağlayıcı Test Yöntemleri.....	11
Çizelge 2.3.	Superpave Deneyleri ve Amaçları.....	15
Çizelge 2.4.	Superpave Performans Esaslı Bağlayıcı Şartnamesi.....	16
Çizelge 2.5.	DSR Deneyinde Kullanılan Bağlayıcı Türlerine Göre Şartname Limitleri.....	24
Çizelge 2.6.	Bitümlü Sıcak Karışımların Temel Özelliklerine Etki Eden Parametreler.....	36
Çizelge 3.1.	Bitüm Katkı Maddelerinin Genel Sınıflandırılması	46
Çizelge 3.2.	Yaygın Olarak Kullanılan Modifiyerlerin Bağlayıcı Üzerindeki Etkisi.....	47
Çizelge 3.3.	Bitümlü Karışımlarda Kimyasal Katkıların Olumlu Etkileri..	47
Çizelge 3.4.	Yaygın Olarak Kullanılan Asfalt Modifiyerlerin Muhtemel Olumlu Etkileri.....	48
Çizelge 4.1.	Saf Bağlayıcının (B160/220) Fiziksel Özellikleri.....	53
Çizelge 4.2.	Agrega Gradasyonu.....	54
Çizelge 4.3.	Agreganın fiziksel özellikleri.....	54
Çizelge 4.4.	Nanosilikanın Genel Özellikleri.....	55
Çizelge 4.5.	Saf ve Nanosilika İlaveli Bağlayıcıların Fiziksel Özellikleri..	56
Çizelge 4.6.	Penetrasyon İndeksi (PI) Sonuçları.....	60
Çizelge 4.7.	Bağlayıcıların Kütle Kayıpları.....	61
Çizelge 4.8.	Orijinal Bağlayıcıların DSR Sonuçları.....	62
Çizelge 4.9.	RTFOT Kalıntısı Bağlayıcıların DSR Sonuçları.....	65
Çizelge 4.10.	PAV Kalıntısı Bağlayıcıların DSR Sonuçları.....	68
Çizelge 4.11.	Bağlayıcıların BBR Deney Sonuçları.....	71
Çizelge 4.12.	Bağlayıcıların RV Sonuçları.....	74
Çizelge 4.13.	Bağlayıcıların Karıştırma ve Sıkıştırma Sıcaklık Aralıkları...	76
Çizelge 4.14.	Marshall Dizayn Yöntemiyle B160/220 Saf Karışımın Optimum Bitüm Belirlenmesine Ait Deney Sonuçları.....	83
Çizelge 4.15.	Optimum Bitüm İçeriğinde Kullanılan Değerler.....	86
Çizelge 4.16.	Kontrol Numunesine Ait Sonuçlar.....	86
Çizelge 4.17.	Performans Deneylerinde Kullanılan Numune Sayıları.....	87
Çizelge 4.18.	Nanosilika İlaveli Karışım Numunelerinin Marshall Stabilite ve Akma Değerleri.....	88
Çizelge 4.19.	Karışımların RMS Değerleri.....	91
Çizelge 4.20.	Karışımların ITSM Deney Sonuçları.....	93
Çizelge 4.21.	Karışımların ITS ve ITSr Değerleri.....	96
Çizelge 4.22.	Numunelerin Sünme Sertliği Modülü (Rm) Değerleri.....	102

1. GİRİŞ

İnsan veya yüklerin bir yerden başka bir yere taşınması hareketi ulaşım olarak tanımlanmaktadır. Ulaşım; karayolu, denizyolu, demiryolu, havayolu ve boru hatları olmak üzere çeşitli sistemlerle sağlanmaktadır. Bir ülkenin yaşam standartlarının gelişmişliği ulaşım ile doğrudan ilgilidir.

Karayolu ulaşımı, yük ve yolcu taşımacılığı açısından gerek taşıma kapasitesi gerek güzergâh tasarımındaki kolaylık ve diğer taşıma sistemlerinin tamamlayıcısı durumunda olmasından dolayı en çok gelişen ulaşım sistemidir [1].

Karayolu ulaşımında hedeflenen gelişimin ve güvenliğin sağlanması bazı faktörlere bağlıdır. Asıl hedeflerin başında yapım maliyetlerini ve yapım süreci tamamlandıktan sonra olan bakım maliyetlerini düşürmek, ayrıca kaplama performansını ve hizmet ömrünü artırmak gelmektedir. Bu doğrultuda asfalt teknolojisinde kaplama performansı özelliklerini iyileştirecek çalışmalar hızla devam etmektedir. Çalışmalarda çoğunlukla kaplama yapımında kullanılan malzemelerin kaplamanın ömrünü ve stabilitesini doğrudan ilgilendirdiği göz önünde bulundurularak malzemelerin özellikleri iyileştirilmeye çalışılmakta ya da yeni malzemeler üretilmektedir. Dünya’da ve Türkiye’de karayolu ulaşımında karayolu üstyapıları büyük oranda esnek kaplama olarak dizayn edilmektedir.

Esnek kaplamalar, bitümlü bağlayıcı ve agregadan meydana gelir. Esnek kaplama performansı bitümlü bağlayıcı ve agrega malzemelerinin özelliği ile yakından ilişkilidir. Son yıllarda yol üst yapılarında tekerlek izlerinin oluşumu, soyulmalar, çatlamlar gibi deformasyondan kaynaklanan sorunlar sıkça görülmektedir [2]. Bu nedenlerle bitümün ve/veya bitümlü karışımların modifiye edilerek kaplamaların bozulmalara karşı direncinin arttırılmasına yönelik çalışmalar yapılmaktadır. Modifiye bitüm elde edilmesinde kullanılan katkı maddeleri çok çeşitli olup, bunlar içinde doğal malzemeler, sülfür, kauçuk, polimerler, kauçuklar, doğal asfaltlar, epoksi reçinesi ve son yıllarda kullanımı artan nanomalzemeler yaygın olarak kullanılmaktadır.

Bu tez çalışmasında hem bitüme hemde bitümlü sıcak karışıma (BSK) nanosilika eklenerek bitüm ve bitümlü karışımların performans özelliklerine etkisi incelenmiştir. Nanosilika ilavesiyle elde edilen modifiye bitüm ve karışımların performans özelliklerinin arttırılması hedeflenmiştir.

Çalışmanın ikinci bölümünde BSK hakkında temel bilgilere yer verilmiştir. BSK'ları oluşturan agrega ve asfalt malzemelerinin özelliklerine değinilerek BSK'lardan beklenen özelliklerden ve BSK'larda meydana gelen bozulmalardan bahsedilmiştir. Ayrıca bitüm ve BSK'lara uygulanan geleneksel ve suparpave test yöntemleri izah edilmiştir.

Çalışmanın üçüncü bölümünde; bitüm ve bitümlü karışımların özelliklerinin iyileştirilmesi amacıyla kullanılan katkı maddeleri hakkında genel bilgiler verilerek, kullanılan başlıca katkı türleri verilmiştir. Daha sonra çalışmada katkı olarak kullanılan nanosilika ile modifiye edilmiş bitüm ve bitümlü karışımlar hakkında yapılmış olan araştırmalar incelenmiştir.

Çalışmanın dördüncü bölümünde farklı oranlarda nanosilikanın bitüme ilave edilmesiyle bitümün fiziksel ve reolojik özellikleri üzerindeki etkisi, geleneksel ve Suparpave bağlayıcı testleriyle araştırılmış ve test sonuçları dğerlendirilmiştir. Saf ve modifiye bağlayıcılarla Marshall dizayn yöntemi kullanılarak karışım numuneleri hazırlanmıştır. Hazırlanan numunelere performans deneyleri uygulanmış ve deney sonuçları yorumlanmıştır.

Çalışmanın beşinci bölümünde; dördüncü bölümde yapılan tüm deneysel çalışmaların sonucunda elde edilen veriler genel olarak değerdendirilmiştir.

2. BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIMLAR (BSK)

Karayolu üstyapısında kullanılan kaplamalar, bağlayıcı malzemenin tipine bağlı olarak rijit ve esnek kaplamalar olmak üzere ikiye ayrılır. Rijit yol üstyapılarında bağlayıcı malzeme olarak portlant çimentosu kullanılırken, esnek yol kaplamalarında ise asfalt çimentosu kullanılmaktadır.

Rijit kaplamalar, trafik hacminin fazla olduğu ve taşıt trafiğinin ağır olduğu karayollarında ve havaalanlarında gerekli sürüş konforu ve emniyetini sağlamak amacıyla yapılan yüksek standartlı rijit üstyapılardır. Rijit (beton) kaplamalar, yeterli mukavemete sahip zeminler üzerine belirli bir kalınlıkta serilen granüler alt temel tabakası ile beraber donatısız, kısmen donatılı veya sürekli donatılı beton plaklardan meydana gelmektedir [3].

Esnek kaplamalar, taşıtlar için gerekli performansa (sürüş konforu ve emniyeti) ve taşıtların yarattığı gerilmelere karşı yeterince stabiliteye sahip olacak şekilde farklı özelliklere sahip tabakalardan imal edilen çok tabakalı esnek yapılardır. Esnek kaplamalar genel olarak düşük standartlı ve yüksek standartlı kaplamalar olarak ikiye ayrılmaktadır. Düşük standartlı kaplamalar da sathi kaplamalar, makadam temeller (veya yollar) ve koruyucu satıh tabakalar olarak sınıflandırılır. Yüksek standartlı kaplamalar, bitümlü sıcak karışım (BSK) kaplamalardır [3].

Ülkemizde gerek kent içi, gerekse kent dışı yollardaki esnek kaplamalar büyük oranda kullanılmaktadır. Esnek kaplamaların en üst tabakasını oluşturan kaplama tabakası, üzerine gelen yükleri alt tabakalara iletmesi, taşıtlara sürüş konforu ve emniyet sağlaması amacıyla yapılmaktadır. Yüksek standartlı yollarda kaplama tabakası aşınma ve binder olmak üzere iki tabaka olarak imal edilmektedir. Bitümlü sıcak karışımlar, proje ömrü içinde toplam standart dingil yükü sayısı 3×10^6 'dan fazla olan yüksek standartlı yol kaplamalarında kullanılmaktadır. Bitümlü sıcak karışımlar, belirli gradasyon limitlerine uygun olarak kırılmış ve elenmiş kaba agrega, ince agrega ve mineral fillerin yine uygun bir bitümlü bağlayıcı oranı ile plentte belirli sıcaklıkta homojen olarak karıştırılmasıyla elde edilir ve yola taşındıktan sonra belirli sıcaklıkta sıkıştırılarak kaplama inşaatı gerçekleştirilir. Yapılan karışımlarda; agrega % 93-95, bitüm ise %5-7 aralığında bir oranda kullanılmaktadır. Agrega-asfalt karışımlarının yol kaplamasında kullanılabilmesi için dizayn esnasında stabilite, durabilite, esneklik, yorulma ve kayma direnci, geçirimsizlik ve işlenebilirlik gibi özellikleri sağlaması gerekir [3].

Esnek üstyapının performansını doğrudan etkilemesi sebebiyle yolun öngörülen ömür ve konfor seviyesinin sağlanması bakımından bağlayıcı ve agregaların özelliklerinin bilinmesi büyük önem taşımaktadır.

2.1. Bitümlü Sıcak Karışımlarda Kullanılan Agregalar

Agrega; doğal, yapay veya her iki tip mineral malzemenin çeşitli boyutlardaki kırılmış ve/veya kırılmamış tanelerinden oluşan yığındıdır. Karışımlardaki en önemli ikinci malzeme olan agregalar, bitümlü sıcak karışımların performansında önemli bir rol oynar. Bitümlü sıcak karışımların ağırlıkça %90-95'ini, hacimce ise %75 ile %85'ini oluşturan agregalar, kaplamaların yük taşıma kapasitesini büyük miktarda karşılayarak asfalt kaplamanın performansı üzerinde ciddi bir rol oynarlar. Agregal malzemesi, kaba, ince ve fillerden oluşan üç ayrı dane grubunun belirlenen oranlarda karıştırılması sonucu ile elde edilmektedir [4].

2.1.1. Agregaların Fiziksel Özellikleri

Agregaların fiziksel özelliklerini tespit etmek amacıyla birçok sınıflandırma yapılmaktadır. Bu sınıflandırmalar mineralojik, boyut, gradasyon, biçim, yüzey yapısı, porozite, özgül ağırlık, yüzey alanı ve boşluk oranı olup ve bu sınıflandırmalara göre agregaların uygun olup olmadıkları belirlenmektedir.

Mineralojik olarak agregalar genelde; dere malzemesi, kırmataş ve yapay taşlardan elde edilmektedir. Dere malzemeleri taşıdıkları olumsuz özelliklerden dolayısıyla alttemel hariç yol kaplama tabakalarında kullanılmamaktadır. Yapay taşlar ise genellikle yüksek fırın cürufılarından elde edilmektedir. Yol kaplamalarında kullanılacak en ideal agregal, kayaların kırılması ile elde edilen kırmataş mineral agregalardır [5,6].

Agregalar boyut sınıflandırması bakımından kaba, ince ve filler olarak üç farklı dane grubu şeklinde sınıflandırılmaktadır. Karışımın ana iskeletini kaba agregal oluştururken, ince agregal ve filler bu iskeletin arasındaki boşlukları doldurarak daha yoğun bir karışım elde edilmesini sağlamaktadır [7,8]. Kaba agregal, kırılmış ve elenmiş, taş, çakıl veya bunların karışımından oluşmakta olup ve agregal karışımının 4,75 mm (No.4) elek üzerinde kalan kısmı olup, temiz, pürüzlü, sağlam ve dayanıklı malzemeden oluşmalıdır [5].

İnce agrega; 4,75 mm (No.4) elekten geçip 0,075 mm (No.200) elek üzerinde kalan malzeme olarak tanımlanır. Filler ise; 0,075 mm (No.200) elekten geçen malzeme olarak isimlendirilir.

Gradasyon, agrega karışımını meydana getiren danelerin boyutlarına göre dağılımını ifade etmektedir. Gradasyonundaki maksimum dane boyutu arttıkça işlenebilirlik ve sıkışma güçleşmekte, yoğunluk ve stabilite artarken bağlayıcı ihtiyacı azalmaktadır. Agrega gradasyon yönünden kesikli, yoğun-sürekli, boşluklu-sürekli ve tek boyutlu gradasyon olarak dört sınıfa ayrılmaktadır.

Kesikli gradasyona sahip agregalar, çok az ara boyut agrega içeriği dolayısıyla boşluk boşluk oranı fazladır ve yol inşaatında kullanılmamaktadır. Boşluklu-sürekli gradasyon, filler ya da ince boyutta dane içermeyen ya da çok az içerdiklerinden dolayı boşluk oranı yüksektir ve sıcak karışımlarda kullanılmazlar. Tek boyutlu gradasyonda aynı boyutta çok miktarda dane içerdiğinden düşük standartlı yol kaplamalarında kullanılmaktadır. Yoğun-sürekli gradasyon ise en kaba agregadan en ince agregaya kadar olan agrega boyutlarını uygun oranlarda içerdiğinden karışımın boşluk oranı düşük, dolayısıyla yoğunluğu fazladır. Bu sebeple, yoğun-sürekli gradasyona sıcak karışımlarda kullanılmaktadır [3].

Agrega danelerinin biçimleri, karışımların sıkışma direncine, işlenebilirliğine, yoğunluğuna, stabilitesine, içsel kenetlenmesine ve kayma mukavemetine etki etmektedir. Agregalar biçim bakımından yuvarlak, köşeli, düzensiz, yassı, ince-uzun ve yassı-ince-uzun olarak sınıflandırılmaktadırlar. Yuvarlak biçimli agregaların işlenmesi köşeli agregalara göre daha yüksek olmasına rağmen stabilite bakımından temas noktası sayısı fazla olan köşeli agregalar daha üstün özellik göstermektedir. Agrega danelerinin yüzey pürüzlülüğü arttıkça işlenebilirlik kabiliyeti azalmakta fakat içsel sürtünme açısı, stabilite, kayma mukavemeti ve bitüm ile arasındaki adezyon kuvveti artmaktadır. Bu nedenle cilalı agregaların esnek kaplamalarda kullanımı uygun değildir [3].

Agrega danelerinin asfaltın emilmesini sağlayacak miktarda poroziteye veya su emme yeteneğine sahip ve boşluklarının belli bir düzeyde olması istenir. Agregadaki gözeneklerin boyutu, sayısı ve süreklilikleri, agregaların dayanımını, aşınmaya karşı direncini, yüzey dokusunu, özgül ağırlığını, bağlayıcı ile adezyonunu ve donma ve çözölmeye karşı direncini etkilemektedir. Yeterli poroziteye sahip agregalar, bağlayıcı ile güçlü bir bağ kurarak stabilitenin artmasını sağlar [9].

Agrega danelerinin sahip oldukları yüzey alanlarının toplamı ile daneler arasındaki boşlukların toplamı karışımların tüm özelliklerine etki etmektedir. Toplam yüzey alanı ve toplam boşluk hacmi gradasyon, dane çapı, dane biçimi gibi özelliklere bağlıdır. Agregada dane çapı küçüldükçe toplam yüzey alanı ve boşluk hacmi artacağından gerekli bağlayıcı ihtiyacı artacak, ayrıca karışımın yoğunluğu azalır. Ancak, maksimum dane çapının artması ile işlenebilirlik ve karışımın yoğunluğu da artar, ama buna rağmen gerekli bağlayıcı miktarı azalarak karışımın kohezyonu, stabilitesi ve durabilitesi azalacaktır. Kaplamalarda kullanılacak agregaların maksimum dane çapı seçilirken karışımın bu özellikleri göz ardı edilmemelidir [3].

2.1.2. Agregalara Uygulanan Deneyler

BSK kaplamalarda kullanılacak agregaların uygunluğunun tayini için dane boyutu (elek analizi), Los Angeles (aşınma), hava tesirlerine karşı dayanıklılık, cilalanma, su tesirine karşı dayanıklılık, özgül ağırlık ve yassılık indeksi tayini deneyleri yapılmaktadır (Çizelge 2.1).

Çizelge 2.1. Agregada Deneyleri (Karayolları teknik şartnamesi) [4]

Agrega Deneyleri	Aşınma	Binder	Bitümlü Temel	Sathi Kaplama	Taş Mastik Asfalt
Aşınma, maks %	30	35	35	30	25
Sağlamlık, (MgSO ₄) maks %	16	18	18	18	14
Soyulma Mukavemeti, min %	50	50	50	50	60
Yapışma, maks %	-	-	-	12	-
Cilalanma Değeri, min	50	-	-	50	50
Kırılmışlık, min %	100	100	100	80	-
Yassılık İndeksi, maks %	30	35	35	25	25
Su Absorbsiyonu, maks %	2	2,5	2,5	2,5	2
Metilen Mavisi, maks %	1,5	1,5	2	2	1,5

2.2. Bitümlü Sıcak Karışımlarda Kullanılan Bağlayıcılar

Bitümlü sıcak karışımların performansında önemli bir derecede etkili olan bitümlü bağlayıcılar, sıcak karışımların en önemli malzemesidir. BSK'ların ağırlıkça %5-7'sini, hacimce %13-15'ini oluşturarak agrega danelerinin birbirine

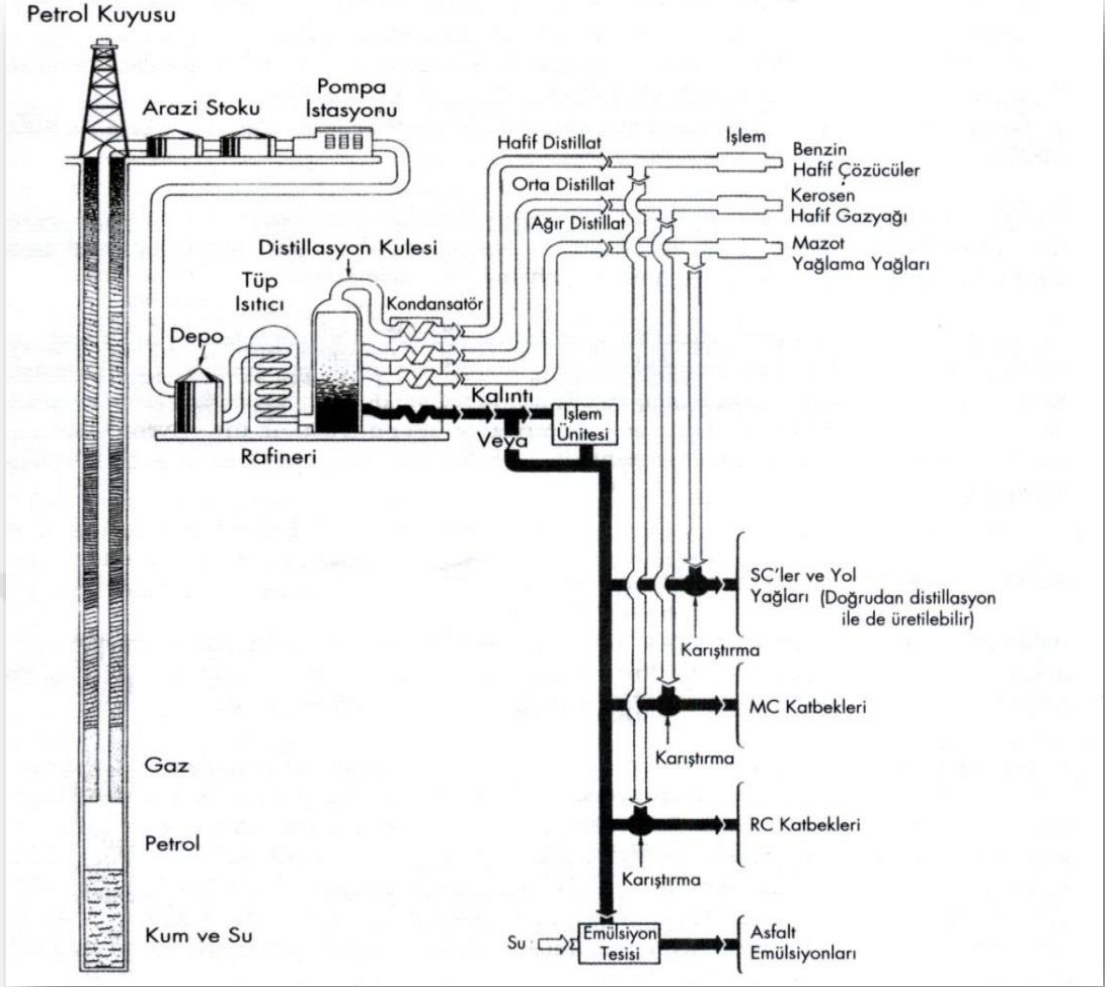
bağlanmasını sağlayan bitümlü bağlayıcılar, trafik yükü altında kaplamanın dağılmasını önler. Böylece sürüş konforunu sağlar, kohezyon ile kaplamanın stabilitesi artar ve geçirimsizlik sağlanır [3].

Bitümlü bağlayıcılar asfaltlar ve katranlar olarak iki gruba ayrılmaktadır.

Asfalt; doğal kökenli veya petrolün damıtılmasıyla elde edilen koyu kahve ile siyah arasında rengi değişen bağlayıcı malzemedir. “Asfalt”, “asfalt çimentosu”, “bitüm” ve “asfalt bağlayıcı” terimleri esnek kaplamalarda aynı anlama gelecek şekilde birbirlerinin yerine kullanılmaktadır [10].

Asfaltlar, elde edilme usüllerine göre doğal ve yapay olarak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Doğal asfaltlar; tabiatta genel olarak mineral maddeler ile karışmış halde bulunmaktadır. Yapay asfaltlar, ham petrolün damıtılması sonucu elde edilirler. Damıtma işleminde kolay uçan kısımlar kulenin üst kısmından çıkar ve soğutucularla yoğunlaştırılarak ayrılmış olur. Bu şekilde meydana gelenler hafif ürünler, daha az uçucu ürünler ise aynı şekilde orta ürünleri meydana getirmektedir. En ağır uçan ürünler ise ağır ürünleri oluşturur. Kalıntılar kulenin dibinde biriktirilir. Bu şekilde ham petrol; benzin, gaz yağı, dizel yağları, yağlama yağları ve ağır kalıntı maddeleri olmak üzere başlıca beş ana kısma ayrılmış olur [11]. Ham petrolün damıtılma şeması Şekil 2.1’de gösterilmiştir.

Katranlar, petrol ürünlerinin yaygın kullanımı başlamadan önce kömür ürünü olan en çok kullanılan bitümlü malzemedir. Katran, zift ile hafif ve ağır yağların doğal ve yapay karışımıdır. Genellikle ham taş kömürünün karbonizasyonu sırasında çıkan buharların yoğunlaştırılmasıyla bir yan ürün olarak elde edilir. Katranın damıtılıp muhtelif organik maddeleri ayrıldıktan sonra geride artık madde olarak zift elde edilir. Katranlar asfalttan daha daha yumuşak olup, sertliğe göre sınıflandırılır. Asfaltlar ve katranlar arasında görünüş ve bazı özellikler yönünden benzerlikler bulunmasına karşın yapı malzemesi olarak bazı farklılıkları vardır. Asfaltlar aynı penetrasyon veya viskoziteye sahip olan katranlara oranlara daha dayanıklıdır.



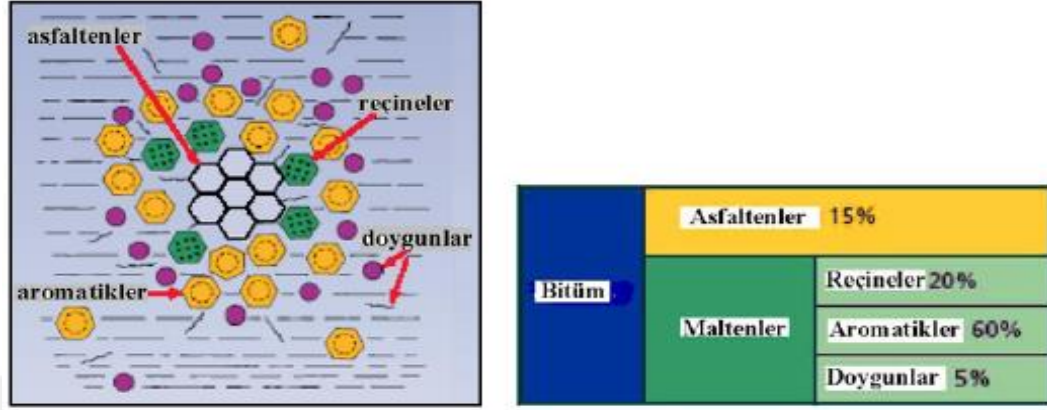
Şekil 2.1. Ham Petrolün Damıtılmasıyla Elde Edilen Asfaltlar [12]

Katranlar asfaltlara kıyasla kimyasal etkilere daha dayanıklıdır. Ancak sıcaklığa karşı daha duyarlı olup, yüksek sıcaklıklarda daha fazla şekil değiştirirler. Islak agregaya, asfalta kıyasla daha iyi yapışır ve temizlenmeleri daha zordur. Soyulmaya karşı daha dayanıklıdır.

2.2.1. Asfaltın Kimyasal Yapısı

Asfalt oldukça karmaşık bir kimyasal yapıya sahiptir. Bu yüzden kimyasal analizi oldukça zahmetli olmakta ve analiz sonucunda çok miktarda veri elde edilmektedir. Ancak asfalt veya bitümü, asfaltenler ve maltenler diye iki gruba ayırmak mümkündür. Maltenler de kendi aralarında doygunlar, aromatikler ve reçineler olmak üzere alt gruplara ayrılmaktadır [13]. Şekil 2.2’de asfaltın yapısı ve bileşenleri gösterilmiştir.

Asfaltenler, bitümün %5-25'ini oluşturan esas olarak karbon ve hidrojenle oluşan ve bir miktar nitrojen, sülfür ve oksijen içeren n-heptan içerisinde çözünmeyen siyah veya kahverengi kendine özgü biçimleri olmayan yapılardır. Genel olarak yüksek molekül ağırlığına sahiptirler ve polar yapıdadırlar [13].



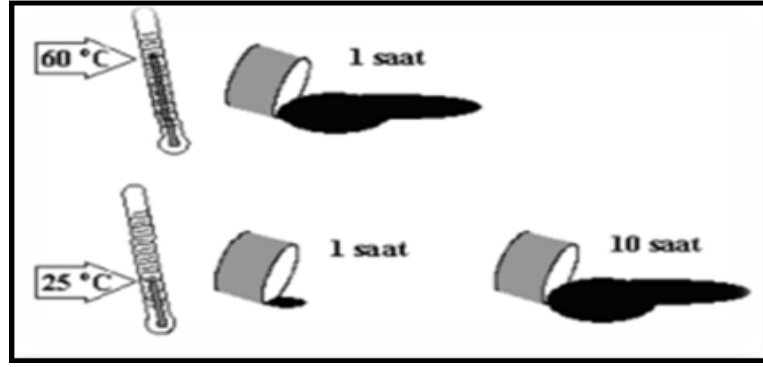
Şekil 2.2. Asfaltın Yapısı ve Bileşenleri [11]

Bitümün n-heptanda çözülen kısmı olan maltenler üç alt gruba ayrılmaktadır. İlk olarak, reçineler n-heptanda çözülebilen yapılardır. Asfaltenler gibi yüksek miktarda hidrojen ve karbonla, küçük miktarda oksijen, sülfür, ve nitrojen içerirler. Aromatikler ise bitümün %40-65'ini oluşturan koyu kahverenkli viskoz yağ şeklindeki yapılardır. Bitümün %5-20'sini oluşturan doygunlar ise genel olarak renksiz, yağlı yapıya sahip olup parafinik ve naftanik yağ halkalarını içeren yapılardır [11,13].

2.2.2. Asfaltın Reolojik Davranışı

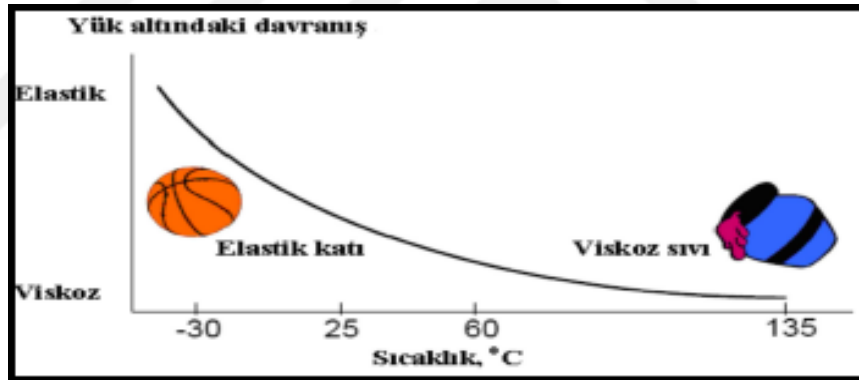
Mühendislik özellikleri bakımından incelendiğinde bitüm viskoelastik bir davranış sergileyen termoplastik bir malzeme olup trafik yükleri altında yükün şiddetine, zamanına ve sıcaklığına bağlı olarak Şekil 2.3'te görüldüğü gibi farklı davranışlar gösteren bir malzemedir [6].

Şekil 2.3'te gösterildiği gibi 60 °C sıcaklıkta 1 saatte gösterdiği akış ile 25 °C sıcaklıkta 10 saatte gösterdiği akış aynı olmaktadır. Bu da sıcaklık ve yükleme süresi arasındaki ilişkinin benzer olduğunu ifade etmektedir. Böyle malzemeler düşük yük altında viskoz, orta yükleme altında orta elastik, yüksek yükleme hızında ise elastik özellik göstermektedir.



Şekil 2.3. Bitümün Farklı Sıcaklık ve Zamana Göre Değişimi [6]

Benzer şekilde, düşük sıcaklıklarda elastik davranış ve yüksek mukavemet, yüksek sıcaklıklarda ise viskoz davranış ve düşük mukavemet gösterirler. Şekil 2.4'te görüldüğü gibi bitümün bu reolojik özelliği asfalt karışımların da visko-elastik özellik göstermesine sebep olmaktadır. Bu nedenle yükleme süresi ve sıcaklık, asfalt çimentosunun ve bitümlü sıcak karışımın rijitliğine doğrudan etki etmektedir [6].



Şekil 2.4. Bitümün Sıcaklıkla Değişimi [6]

2.3. Asfalt Bağlayıcılara Uygulanan Geleneksel Deneyler

Esnek kaplamalarda kullanılan asfalt bağlayıcıların fiziksel özelliklerini belirlemek amacıyla dünyanın birçok ülkesinde ve ülkemizde yaygın olarak çeşitli geleneksel deneyler yapılmaktadır.

Bu deneyler; penetrasyon, yumuşama noktası, duktilite, parlama noktası, ısıtma kaybı ve özgül ağırlık gibi deneylerdir (Çizelge 2.2).

Çizelge 2.2. Geleneksel Asfalt Bağlayıcı Test Yöntemleri [6]

Test Türü	Standart Koşullar	Deney Standartı
Penetrasyon Deneyi	25°C, 5sn, 100 gr	ASTM D5-AASHTO T49 EN 1426- TS 118
Yumuşama Noktası Deneyi	-	ASTM D36- EN 1427- TS 120
Düktilite Deneyi	25°C, 5 cm/dak	ASTM D113- AASHTO T5- TS 119
Parlama Noktası Deneyi	-	ASTM D113- AASHTO T5- TS 119
Çözünürlük Deneyi	-	ASTM D2042- AASHTO T44- TS 1090
Dinamik Viskozite Deneyi	60°C	ASTM D2171- AASHTO T202
Kinematik Viskozite Deneyi	135°C	ASTM D2170- AASHTO T201 EN 12595
Isıtma Kaybı (TFOT) Deneyi	163°C, 5 saat	ASTM D1754- AASHTO T179
Isıtma Kaybı (RTFOT) Deneyi	163°C, 75 dak	ASTM D2872- AASHTO T240
Özgül Ağırlık Deneyi	25°C	TS 1087- ASTM D70

2.3.1. Penetrasyon Deneyi (TS 118, TS EN 1426, ASTM D5)

Penetrasyon deneyi bitümlü bağlayıcının sertlik derecesini belirlemek yada bir başka deyişle kıvamını tayin etmek amacıyla yapılır. Penetrasyon, standart penetrasyon deney aleti (Şekil 2.5) ile yapılarak 100 gr ağırlığındaki özel bir iğnenin 25°C sıcaklıkta, 5 saniye süreyle bitüm içerisinde ilerlediği düşey mesafe olarak tanımlanmaktadır. Deney birimi 0,1 mm dir. Bitümün penetrasyon değeri kıvamı ile ters orantılıdır [15].



Şekil 2.5. Standart Penetrasyon Deney Aleti

2.3.2. Yumuşama Noktası Deneyi (TS 120, TS EN 1427, ASTM D36)

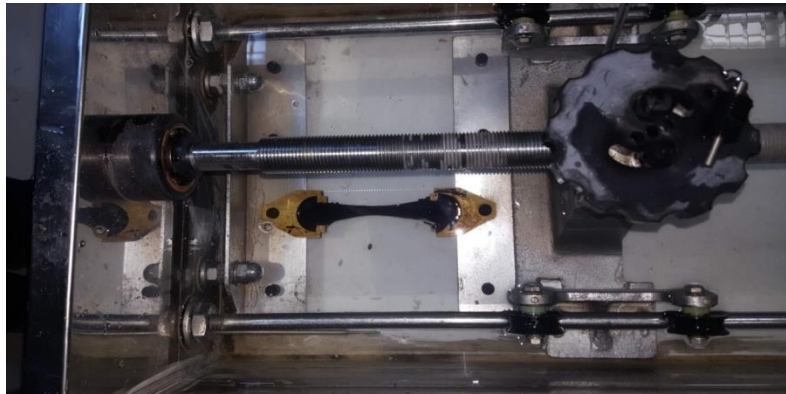
Bitümün yumuşama noktasının tayini için bu deney uygulanmaktadır. Deneyde bitümle doldurulmuş olan deneye has iki yuvarlak halka deney düzeneğine yerleştirilir ve bu halkalar üzerine birer adet bilye koyulur. Deney için başlangıç sıcaklığı 5°C'dir ve sıcaklık cihaz tarafından otomatik olarak dakikada 5°C artırılır. Bitümlü malzemenin düzenek tabanına değdiği anda cihaz otomatik olarak yumuşama noktası değerini sağ ve sol okuma olarak ayrı ayrı göstermektedir [15]. Şekil 2.6'da yumuşama noktası cihazı gösterilmektedir.



Şekil 2.6. Yumuşama Noktası Cihazı

2.3.3. Düktilite Deneyi (TS 119, TS EN 12589)

Bitümün kohezyon mukavemeti yeteneği, ortam sıcaklığındaki düktilitesi ile ölçülmektedir. Deney, standart düktilite deney kalıbı içerisinde hazırlanmış ve soğutulmuş numunenin, belirli miktarda su dolu düktilite cihazı (Şekil 2.7) içerisinde 25°C sıcaklıkta ve 5 cm./dak. hızla çekilerek kopuncaya kadar uzadığı miktar olarak belirlenmektedir [15].

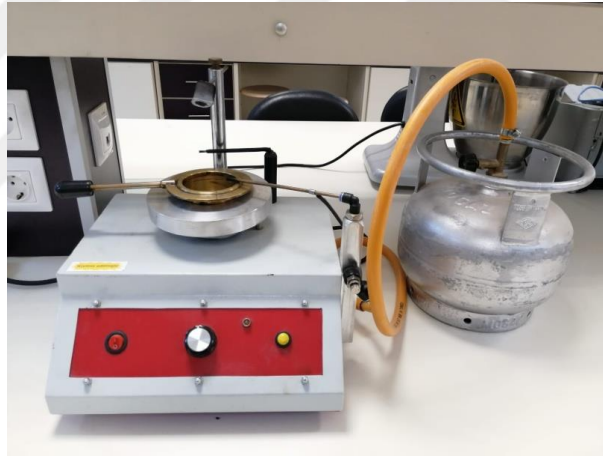


Şekil 2.7. Düktilite Cihazı

2.3.4. Parlama Noktası Deneyi

Bir bitümün parlama noktası, ısıtılan numunenin yüzeyine deney aletinin temas ettirilmesiyle parlayıp fakat yanmayı sürdüremediği en düşük sıcaklık değeridir. Petrol türevi ürünlerin parlama değerinin bilinmesi, uygulama esnasında ortaya çıkabilecek tehlikelerin önlenmesi açısından oldukça önemlidir [11].

Deney yapılacak olan bitümlü malzeme 150°C'ye kadar ısıtıldıktan sonra hava kabarcığı kalmayacak şekilde deney kabının belirli seviye çizgisine gelene kadar doldurulur ve soğutulur. Cihaz sıcaklığı ilk safhada dakikada 14-17°C artacak şekilde ayarlanır. Cihaz sıcaklığı 28°C'ye ulaştığında dakikada 5°C artacak şekilde ısıtıcı hızı ayarlanır ve numune üzerinden deney alevi geçirilir. Alev çapı yaklaşık olarak 4mm civarındadır. Alev kabın üzerinden 1 saniye içerisinde geçirilmelidir. Numune yüzeyinde herhangi bir noktada olan tutuşma görüldüğü anda yapılan okuma parlama değeri olarak kabul edilmektedir [11]. Şekil 2.8'de parlama noktası cihazı gösterilmektedir.



Şekil 2.8. Parlama Noktası Cihazı

2.3.5. Özgül Ağırlık Deneyi (TS 1087)

Bağlayıcının belirli bir hacimdeki ağırlığının aynı hacimdeki suyun ağırlığına oranına özgül ağırlık denilir. Özgül ağırlık tayini için piknometre metodu kullanılmaktadır. İlk olarak boş kap tartılır. Sonrasında kap su ile doldurulup tekrar tartılır. Kap içerisindeki su boşatılıp kap tekrar kurutulduktan sonra uygun miktarda bağlayıcı koyulup tekrar tartılır. Isıtılmış bağlayıcı kap içerisinde dökülürken hava kabarcıklarının oluşmamasına dikkat edilir. Bağlayıcının üzerine kalan miktarda su eklenerek tartım işlemi yapılır. Deneyde kullanılan suyun saf olması gerekir. Uygun

deney sıcaklığı ise 25°C 'dir [16]. Şekil 2.9'da piknometre kabı ile özgül ağırlık tayini deneyi yapım aşaması görülmektedir.



Şekil 2.9. Piknometre Kabı ile Özgül Ağırlık Tayini

2.4. Superpave Asfalt Bağlayıcı Deneyleri

Günümüz trafiğinin gereksinimlerini geniş çapta yerine getirmeye çalışan, her türlü hava şartlarında yolun performansını koruyarak hizmet vermesini sağlamak için Üstün Performanslı Asfalt Kaplama (Superpave) yöntemi geliştirilmiştir [6].

Superpave asfalt bağlayıcı deneylerinde; deneyler standart deney sıcaklıklarında değil, kaplamanın hizmet vereceği bölgedeki sıcaklıklarda yapılarak asfaltın saha performansı ile doğrudan ilgili fiziksel ve reolojik özellikleri analitik olarak tespit edilir.

Superpave test yöntemleri saf ve modifiye bitümlü bağlayıcılar üzerinde uygulanmaktadır. Bu deneyler; kısa dönem yaşlanmayı tespit eden, Dönel İnce Film Halinde Isıtma Deneyi (RTFOT), uzun dönem yaşlanmayı tespit eden Basıncılı Yaşlandırma Kabı (PAV) Deneyi, bağlayıcının işlenebilir özelliğinin tespit edilmesi için yapılan Dönel Viskozimetre (RV), düşük ısı çatlaklarına karşı dayanımın belirlenmesi için Kiriş Eğme Reometresi (BBR) ve Doğrudan Çekme (DDT), orta ve yüksek sıcaklık dayanımlarının tespiti için yapılan Dinamik Kayma Reometresi (DSR) deneyidir.

Çizelge 2.3'te Superpave bağlayıcı deneyleri ve kullanım amaçları verilmiştir.

Çizelge 2.3. Superpave Deneyleri ve Amaçları [6]

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

Superpave yönteminde bağlayıcılar, farklı sıcaklık koşullarında gösterdikleri performanslara göre sınıflandırılır ve PG simgesi ile tanımlanmaktadır. Performans dereceli (PG) bağlayıcılar, PG 52–22 gibi bir ifade kullanılarak tanımlanmaktadır. Burada ilk sayı olan 52, “yüksek sıcaklık derecesi” olarak isimlendirilir [6].

Aşağıda Çizelge 2.4’de gösterilen Superpave performans esaslı bağlayıcı şartnamesi, modifiye edilmiş ve edilmemiş asfalt bağlayıcıların her ikisine de uygulanmaktadır [6].

Çizelge 2.4. Superpave Performans Esaslı Bağlayıcı Şartnamesi [6]

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			
ORJINAL 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						
DÖNELİNCE 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			
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 2.4. Superpave Performans Esaslı Bağlayıcı Şartnamesi (Devamı) [6]

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	40		-10	-16	-22	-28	-34		-10	-16	-22	-28	-34			
ORIGINAL 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* $\sin\delta$, 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	- 6	- 12	- 18	- 24		0	- 6	- 12	- 18	- 24			
Direkt Çekme, TP3, minimum, %1.0 Test sıcaklığı, °C	0	-	-	-	-	-	-	0	- 6	- 12	- 18	- 24		0	- 6	- 12	- 18	- 24			

2.4.1. Dönel İnce Film Halinde Isıtma Kaybı Deneyi (RTFOT)

Asfalt bağlayıcının karıştırma ve yapım sırasındaki kısa süreli yaşlanmasını temsil eden Dönel İnce Film Etüvü Deneyi (RTFOT), AASHTO T240 veya ASTM D2872 şartnamelerine göre yapılmaktadır. İnce bir film halinde özel şişelerinin içerisinde dönel tablada hareket eden bitümlerin, sıcaklık ve havanın etkisiyle malzemenin fiziksel özelliklerindeki değişimini tayin etmek amacıyla yapılmaktadır. 163°C sıcaklıktaki cihaza 8 adet şişenin her birine 35 gr. malzeme doldurulup düşey ekseninde 15 devir/dakika yapacak şekilde cihaza yerleştirilir ve 75 dakika süre başlatılır. Dönme esnasında deney aletinin tabanında bulunan bir hava üfleyici şişelere hava verir. Sıcaklığın etkisiyle asfalt malzeme şişeleri tam olarak kaplar ve film tabakası oluşturur [17]. Deney sonunda önceden işaretlenmiş ve tartılmış iki şişe kütle kaybını tayin etmek amacıyla cihazdan çıkarılınca ağırlıkları tekrar tartılır. Geri kalan altı şişe ise sonraki deneylerde kullanılmak amacıyla saklanır. Eşitlik (2.1) 'de verilen bağıntıyla kütle kaybı hesaplanmaktadır. M1 yaşlanmadan önceki ağırlık, M2 yaşlanmadan sonraki ağırlığı göstermektedir [15].

$$\text{Kütle Kaybı (\%)} = \frac{M_1 - M_2}{M_1} \times 100 \quad (2.1)$$

Şekil 2.10'da RTFOT cihazı (a) ve deney şişeleri (b) gösterilmektedir.



Şekil 2.10. RTFOT Cihazı (a) ve Deney Şişeleri (b)

2.4.2. Basınçlı Yaşlandırma Kabı (PAV) Deneyi (AASHTO PP1)

Arazide servis sırasında bitümde oluşan uzun süreli yaşlanmayı laboratuvar ortamına yansıtabilmek amacıyla Basınçlı Yaşlandırma Kabı (PAV) deneyi geliştirilmiştir [19]. PAV deneyi, kaplama servis ömrünün ilk 5–10 yılı boyunca asfalt bağlayıcıda meydana gelen uzun süreli yaşlanmayı temsil etmektedir [6].

Deneyde, uzun süreli yaşlanmayı temsil etmek üzere, her numune kabına 50 gram numune koyulmaktadır. Asfalt numunesi bir basınç kabına konularak etüvde 20 saat süreyle standart sıcaklık ve basınç altında bırakılır. Deneyde kullanılacak asfalt bağlayıcı, RTFOT deneyinden elde edilen yaşlandırılmış numunelerden alınmaktadır. Böylece kaplamanın karıştırma, yapım ve hizmet esnasında karşılaşacağı çevresel koşullar deneylere yansıtılmış olmaktadır [18].

Şekil 2.11’de PAV deney cihazı görülmektedir.



Şekil 2.11. PAV Deney Cihazı

2.4.3. Dönel Viskozimetre Deneyi (RV)

Dönel vizkozimetre (RV) deneyi, bitümlü bağlayıcıların yüksek sıcaklıklardaki akışkanlık karakteristiklerinin tayini için yapılmaktadır. Bu amaçla AASHTO TP48 standardına uygun olarak “Brookfield Viskozimetresi” kullanılmaktadır (Şekil 2.12). Bağlayıcıların yüksek sıcaklık viskozite değerleri, pompalanma ve karıştırma sırasında bağlayıcıların yeterince akışkan özelliğe sahip olup olmadıklarının tespiti için belirlenmektedir. Genellikle orijinal bağlayıcılar üzerinde uygulanan RV deneyinde 135°C’deki viskozite değeri 3000 cP’yi aşmaması istenmektedir [20]. Deney için bağlayıcıdan yaklaşık olarak 30 gr malzeme alınarak sıcaklığı 150°C’den daha düşük olan etüvde ısıtılarak bağlayıcı akışkan hale getirilir. Malzemeden yaklaşık olarak 11 gr. numune bölmesine doldurulur. Numune bölmesi, sıcaklığı sabit değere ulaşmış sıcaklık kontrollü kaba yerleştirilir ve 15 dakika sabit sıcaklıkta bekletilerek deney yapılır. Deneyde bir motor yardımıyla milin düzenli olarak 20 rpm. hızla dönmesi sağlanır. Yaklaşık olarak eşit viskozite değerlerine erişildikten itibaren üç adet okuma yapılır ve üç değerın ortalaması alınarak bağlayıcının viskozitesi belirlenmiş olur. BSK’ların karıştırılmasında bitümlü bağlayıcının 170±20 cP, sıkıştırılmasında ise

280±30 cP viskozite değerine sahip olması istenmektedir [18]. Bu viskozite değerlerine karşılık gelen sıcaklık değerleri karıştırma ve sıkıştırma sıcaklığı olarak alınmaktadır. 135°C ve 165°C sıcaklıkta yapılan dönel viskozimetre deneylerinden elde edilen değerler sıcaklık-viskozite grafiğinde yerine konularak bağlayıcıların karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları belirlenmektedir.

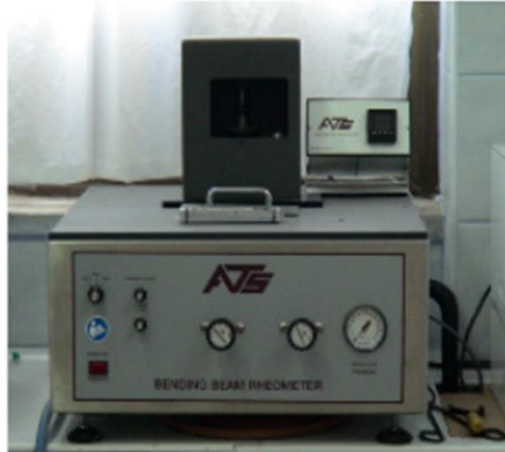


Şekil 2.12. Brookfield Viskozimetre ve Deney Tüpleri

2.4.4. Kiriş Eğme Reometresi (BBR)

Bitüm, termoplastik özelliğinden dolayı düşük sıcaklıklarda rijit (katı) özellik göstermektedir. Kiriş eğme reometresi (BBR) deneyinin amacı, düşük sıcaklıklarda bitümlü bağlayıcıların rijitlik ve mukavemet özellikleri arasındaki ilişkinin tam olarak belirlenememesinden dolayı belirli bir sıcaklıkta sabit yük altında bağlayıcının ne kadar sünme yapacağını tespit etmektir [18]. Deney için PAV deneyinden elde edilen yaşlandırılmış numuneler kullanılmaktadır.

Şekil 2.13’de BBR deney aleti görülmektedir.



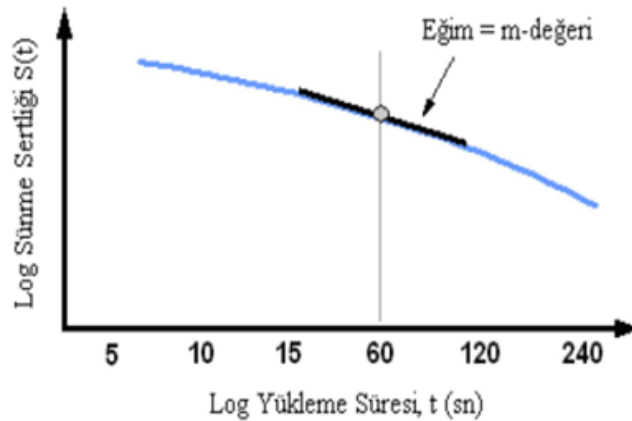
Şekil 2.13. Kiriş Eğme Reometresi (BBR) Deney Aleti

Deney boyunca bağlayıcı kiriş numunesi, bağlayıcı sınıfına göre sabit düşük sıcaklık değerinde tutulmaktadır. Deney için 6,35x127x12,7 mm. boyutlarındaki kalıplar kullanılmaktadır. AASHTO TP1 standardına uygun olarak yapılan kiriş eğme reometresi deneyinde asfalt kirişin orta noktasından 240 saniye boyunca 980 mN'luk yük etki ettirilmektedir (Şekil 2.14).



Şekil 2.14. BBR Deneyi İçin Numune Hazırlanması (a) ve Deneyin Yapılması (b)

Deney sonunda yük ve defleksiyon, bağlayıcının sünme sertliğini ve sünme oranının tayininde kullanılır. Sünme sertliği, numunelerin sabit sünme yüklerine karşı dayanımının bir göstergesidir. Sünme oranı (m-değeri) ise sünme sertliğindeki değişiklikler ile yükleme süresi arasındaki oranı belirtmektedir. Yüke ve defleksiyona bağlı olarak sünme sertliği değeri belirlendikten sonra sünme sertlik değerlerinin zamanla değişimini gösteren bir grafik çizilir (Şekil 2.15). Bu grafikte eğriye teğet olan doğrunun 60.saniyedeki eğimi sünme oranını (m-değeri) vermektedir. AASHTO TP1 standardına göre sünme sertlik değerinin maksimum 300 Mpa ve sünme oranı değerinin ise minimum 0,300 olması gerekmektedir [15].



Şekil 2.15. Sünme Oranının Belirlenmesi [15]

2.4.5. Dinamik Kesme Reometresi (DSR)

Bağlayıcıların orta sıcaklıklardaki yorulma ve yüksek sıcaklıklardaki tekerlek izi oluşumuna karşı dayanımını tespit etmek amacıyla dinamik kesme reometresi deneyi uygulanmaktadır. Bitümlü bağlayıcıların tekerlek izi oluşumuna karşı dayanımlarının tayini için işlem görmemiş ve RTFOT yöntemiyle yaşlandırılmış numuneler kullanılırken, bağlayıcıların yorulma davranışlarını belirlemek amacıyla PAV yöntemiyle yaşlandırılmış numuneler kullanılmaktadır. Numune boyutları, tekerlek izi dayanımını tespit etmek için 25 mm çapında ve 1000 mikron yükseklikte, yorulma dayanımını tespit etmek için ise 8 mm çapında ve 2000 mikron yüksekliktedir [16]. Deneylerde kullanılan DSR deney aleti Şekil 2.16’da görülmektedir.



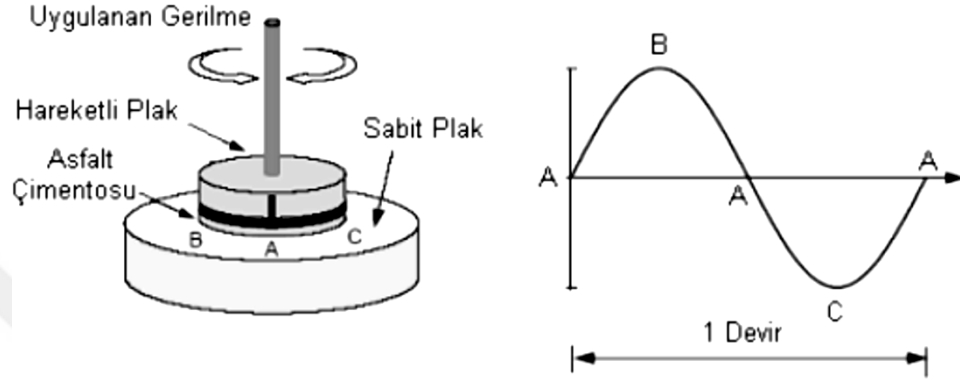
Şekil 2.16. Bohlin DSR II Dinamik Kesme Reometresi

Deneyde bitümlü numuneler doğrudan plaklar üzerine dökülebildiği gibi silikon kalıplar ile de numune hazırlanabilmektedir. Silikon kalıplarla numune hazırlanışı ve numunenin deney aletine yerleştirilişi Şekil 2.17’de görülmektedir.



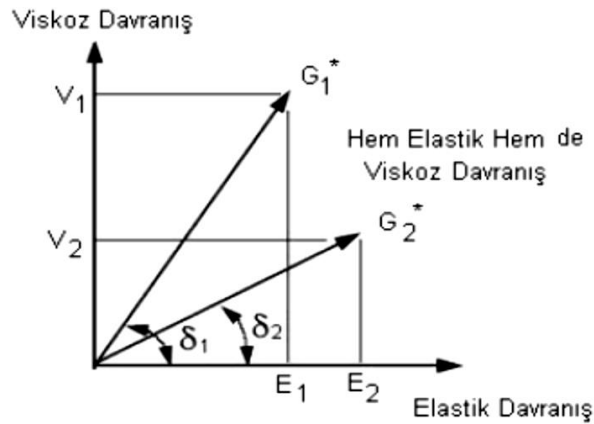
Şekil 2.17. Numunenin Silikon Kalıba Doldurulması (a) ve Üst Plağa Yerleştirilmesi (b)

Deneyde, Şekil 2.18’de görüldüğü gibi sabit alt plak ve hareketli üst plak arasına bağlayıcı numunesi yerleştirilmektedir. Hareketli üst plak A noktasından B noktasına gidip geri dönerek A noktasına geldikten sonra C noktasına gitmektedir. Daha sonrada tekrar A noktasına ulaşmaktadır. Bu döngüye bir devir denilmektedir ve deney boyunca tekrarlanmaktadır. Deneyde dönme frekansı ise yaklaşık 1,59 devir/saniye’dir. Deneyde ortam şartlarını yansıtması amacıyla 10 devir ön koşullandırma yapılır. Daha sonra 10 devirlik standart deney uygulanmaktadır [18].



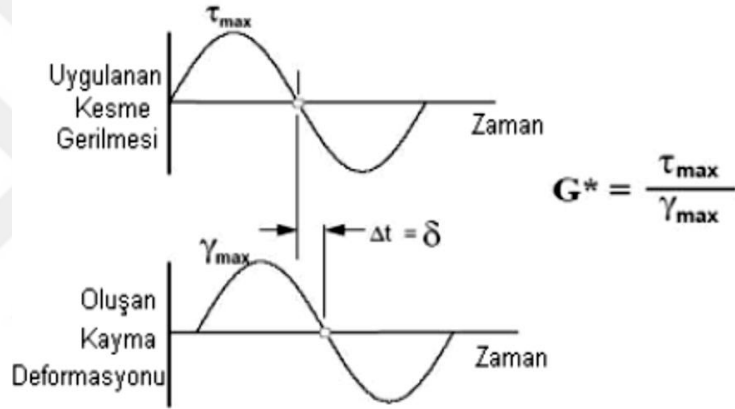
Şekil 2.18. DSR Deneyinde Numunelere Uygulanan Deformasyon Yönleri [18]

Dinamik kesme reometresi deneyi, bitümlü bağlayıcının kompleks kayma modülü (G^*) ve faz açısını (δ) belirleyerek viskoz ve elastik davranışını temsil etmektedir (Şekil 2.19). Şekilde G^* , tekerrür eden kayma gerilmelerinin oluşturduğu deformasyonlara karşı bağlayıcının gösterdiği toplam direnci temsil eder. Faz açısı (δ) ise uygulanan gerilme ile meydana gelen deformasyon arasındaki zaman aralığına (Δt) eşit olmaktadır. Hem G^* hem de δ değerleri bağlayıcının sahip olduğu ısı ve yükleme hızı ile önemli ölçüde değişmektedir [31].



Şekil 2.19. Asfalt Bağlayıcının Viskoelastik Özelliği [18]

Viskoelastik davranışı ifade eden Şekil 2.19’da görüldüğü gibi yatay eksen elastik davranışı (sıcaklık düşük, yükleme hızı yüksek) gösterirken, dikey eksen ise viskoz davranışı (yükleme hızı düşük, sıcaklık yüksek) temsil etmektedir. Ancak normal kaplama ısısı ve normal yükleme durumlarında asfalt bağlayıcı hem elastik hem de viskoz davranış sergilemektedir. Asfalt bağlayıcının visko-elastik özelliğe sahip olması ve her bir asfalt bağlayıcının birbirinden farklı olması nedeniyle 1 ve 2 numaralı asfaltların yük altındaki viskoz ve elastik bileşenleri de birbirinden farklı olmaktadır. Şekilden görülebileceği gibi visko-elastik özellik hem G^* ’a hem de δ ’a bağlıdır. Bu nedenle asfalt çimentosunun visko-elastik özelliği, G^* ve δ birlikte göz önüne alınarak belirlenmelidir. Faz açısı (δ), uygulanan gerilme ile meydana gelen deformasyon arasındaki zaman aralığına (Δt) eşit olmaktadır. Faz açısı Şekil 2.20’de gösterilmiştir [31].



Şekil 2.20. Viskoelastik Malzemelerin Gerilme-Deformasyon İlişkisi [31]

AASHTO TP-5 standardına uygun olarak yapılan bu deneyde yorulma ve tekerlek izi oluşumuna karşı dayanım şartname limitleri Çizelge 2.5’de gösterilmiştir [31].

Çizelge 2.5. DSR Deneyinde Kullanılan Bağlayıcı Türlerine Göre Şartname Limitleri [31]

Bağlayıcı Türü	Deney Amacı	Şartname Limitleri
Orijinal	Tekerlek izi oluşumuna karşı dayanım	Min 1000 Pa
RTFOT	Tekerlek izi oluşumuna karşı dayanım	Min 2200 Pa
PAV	Yorulmaya karşı dayanım	Maks 5000 kPa

2.4.6. Doğrudan Çekme Deneyi (DDT)

Bitümlü bağlayıcı çekme gerilmesine tabi tutulduğunda yeterince sünme gösterirse sünek (düktil), sünme göstermeden koparsa kırılğan (gevrek) olarak isimlendirilmektedir. Yani bitümlü bağlayıcı ne kadar rijit (sert) ise o kadar gevrek, ne kadar yumuşak ise de o kadar sünek davranış gösterir. İdeal bir bağlayıcı düşük sıcaklıklarda da bir miktar sünek davranış sergilemelidir. Aksi takdirde trafik yüklerinin etkisiyle kaplamada düşük ısı çatlakları oluşmaktadır [5].

BBR deneyi ile belirlenen sünme rijitliği, bağlayıcının kopmadan önceki sünme kapasitesini tam olarak ifade edememektedir. Orijinal, PAV'da ve RTFOT aletinde yaşlandırılmış bağlayıcılar üzerinde uygulanabilen DDT deneyi yardımıyla, rijit ama düktil özellik gösteren bağlayıcıların BBR deney sonuçları 300-600 mPa. arasında kalıyor ise doğrudan çekme deneyine ihtiyaç duyulmaktadır [16].

2.5. Bitümlü Sıcak Karışımlara Uygulanan Performans Deneyleri

Yol üstyapısının analitik olarak tasarlanabilmesi, üstyapı tabakalarında kullanılan malzemelerin ve karışımların özelliklerinin tam olarak bilinmesine bağlıdır. Analitik üstyapı tasarımında, yapının analizi için yük-deformasyon veya gerilme-şekil değiştirme özellikleri ve malzemelerin bozulma özelliklerinin göstergesi olan performans özellikleri olmak üzere iki grup özellik değerlendirilir. En önemli performans özellikleri, bitümlü tabakalarda oluşan yorulma çatlağı ile üstyapıdaki her türlü tabakada görülen kalıcı deformasyondur [13].

Bitümün özelliğinden dolayı bitümlü karışımlar visko-elastik ve termo-plastik özellik gösterdiklerinden, laboratuvar deneylerindeki sıcaklık, yükleme süresi, gerilme durumları, sıkıştırma gibi koşullar mümkün olduğunca arazi şartlarına benzer hale getirilmelidir. Arazideki gerilme şekilleri laboratuvar da güçlükle sağlanabildiğinden, arazideki davranışın belirli bazı yönlerini sağlayan birçok basitleştirilmiş deney bulunmaktadır [15].

Bitümlü sıcak karışımların performans özelliklerinin tayini için Marshall numuneleri üzerinde Marshall stabilite ve akma, kalıcı Marshall stabilitesi (RMS), dolaylı çekme mukavemeti (ITS), Modifiye Lottman deneyi, dolaylı çekme rijitlik modülü (ITSM) deneyi, statik sünme deneyi gibi deneyler yapılmaktadır.

2.5.1. Marshall Stabilite ve Akma Deneyi

Bitümlü sıcak karışım numuneleri üzerinde Marshall stabilite ve akma deneyi TS EN 12697-34 standardına uygun şekilde yapılmaktadır. Stabilite; numunenin deformasyona karşı maksimum dayanım olarak tanımlanırken, akma ise numunenin maksimum yüke ulaşıldığı anda oluşan düşey deformasyonu olarak tanımlanmaktadır. Deney standardına göre öncelikle önceden hazırlanan sıkıştırılmış ve soğumuş numunelerin yükseklikleri ölçülerek kaydedilmektedir. Daha sonra numuneler $60\pm1^{\circ}\text{C}$ sıcaklığa sahip su banyosunda 30-40 dakika bekletilmektedir. Kırma çenesi ise $60\pm1^{\circ}\text{C}$ sıcaklıktaki suda 30 dakika veya $60\pm1^{\circ}\text{C}$ sıcaklıktaki etüvde 60 dakika bekletilmelidir. Bu sürenin sonunda numune sudan çıkarılarak kırma çenesine ortalananak biçimde yerleştirilmekte ve numuneye 50 ± 2 mm/dakika hızla yükleme yapılmaktadır.

Marshall deney düzeneği Şekil 2.21’de görülmektedir.



Şekil 2.21. Marshall Stabilite ve Akma Deneyi Cihazı

Deneyde, maksimum yük ve maksimum yüke ulaşıldığı andaki deformasyon değerleri kaydedilmektedir. Numunenin sudan çıkmasından itibaren 40 sn süreyle deney sonlandırılmalıdır. Deneyde standart numune yüksekliğinin 63,5 mm olduğu kabul edilmektedir. Farklı yüksekliklere sahip numuneler için stabilite düzeltme katsayıları eşitlik (2.2) yardımıyla tespit edilmektedir.

$$c = 5.24 \times e^{(-0.0258 \times h)} \quad (2.2)$$

Eşitlikte; c, düzeltme katsayısı, h ise mm olarak numune yüksekliğidir. Elde edilen stabilite ve akma değerlerinin ortalaması alınmaktadır. Bu sayede stabilite ve

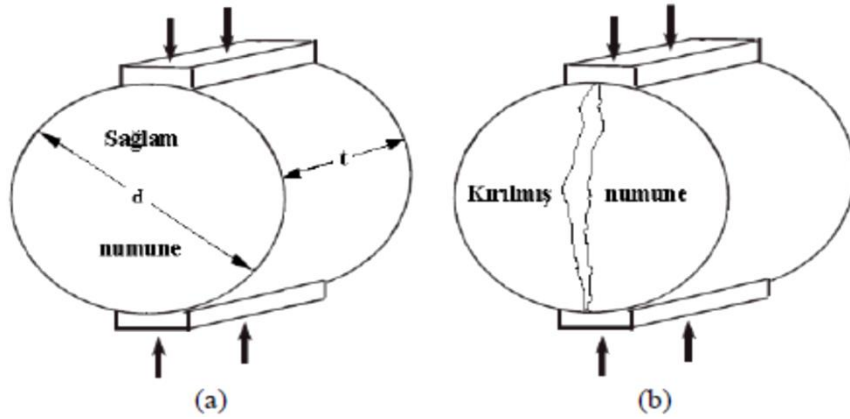
akma değerleri belirlenmektedir. Stabilite ortalamasından %15 farklı stabilite değerine sahip olan numuneler ve akma ortalamasından %20 farklı akma değerine sahip numuneler değerlendirmeden çıkarılmaktadır. Daha sonra geri kalan numunelerin ortalaması alınarak numunelerin stabilite ve akma değerlerinin ortalamadan sapma miktarları belirlenmektedir. Eęer aynı oranda sapma (stabilite için %15, akma için %20) olan numuneler varsa numune serisi iptal edilmekte ve yeni bir seri numune üzerinde deney tekrarlanmaktadır [6].

Marshall oranı (MQ), Marshall stabilite değerinin akma değerine bölünmesiyle belirlenmektedir. Marshall oranı, karışımın sertliğinin ve bitümlü sıcak karışımların deformasyona karşı direncinin bir göstergesidir [21-22].

2.5.2. Dolaylı Çekme Mukavemeti (ITS) Deneyi

Dolaylı çekme mukavemeti (ITS) deneyi, Marshall stabilitesi deney aleti ve dolaylı çekme gerilmesi deney ekipmanları kullanılarak, silindirik asfalt numunesinin çap düzlemi doğrultusuna paralel olarak 50 mm/dakika hızda sabit bir basınç yükü uygulanarak AASHTO T245 veya ASTM D4123'e göre yapılmaktadır. Numune kırılıncaya kadar yüklemeye devam edilmektedir. Numunenin aldığı en büyük yük değeri kaydedilir [6,11].

Şekil 2.22'de numunenin deney başlangıcındaki ve sonrasındaki durumu görölmektedir.



Şekil 2.22. ITS Deneyi Yükleme Durumu (a) ve Kırılma Düzlemi (b) [6]

Dolaylı çekme mukavemeti eşitlik (2.3)'teki bağıntı yardımıyla hesaplanmaktadır [6].

$$ITS = \frac{2P_{max}}{\pi \cdot h \cdot d} \quad (2.3)$$

Burada;

ITS : Dolaylı çekme mukavemeti (kPa),

P_{max} : Maksimum yük (kN),

h : Numune yüksekliği (mm),

d : Numune çapı (mm).

ITS deneyi, genel olarak bitümlü karışımların çekme mukavemeti özelliklerinin tayini için yapılmaktadır. Dolaylı çekme mukavemeti bitümlü karışımların sıcaklık ve yorulma nedeniyle oluşan çekme gerilmelerini karakterize eder. Ayrıca, dolaylı çekme mukavemeti değeri ve bozulma deformasyonu, bitümlü karışımların yorulma çatlaklarının oluşma potansiyeli ve karışımın optimum bitüm içeriğinin tespitinde de kullanılabilir. Bununla beraber, bu değerler karışımın sıcaklık, nem ve farklı dingil yükleri karşısında sergilediği davranış hakkında bilgi almak içinde kullanılabilir [11].

Bu deney, genel olarak bitümlü karışımların kohezyon kuvvetinin tayininde de kullanılmaktadır. Ayrıca, karışımın orta sıcaklıklardaki tekerlek izi direncinin önemli bileşenleri olan sertlik ve durabilitesini değerlendirmek için de kullanılabilir. Deney, karmaşık test ekipmanlarını gerekli kılmaz ve laboratuarda Marshall ve Yoğurtmalı pres cihazlarıyla üretilmiş biriketlere de uygulanabilmektedir. Bitümlü karışımın ITS değeri, karışımın kohezyon kuvvetine bağlı olarak artar ve bu yüzden bağlayıcının özelliklerinden güçlü bir şekilde etkilenir. Karışımın ITS değeri, karışımın orta sıcaklıklardaki stabilitesini sağlar, durabilite ve soyulma potansiyelinde olduğu kadar tekerlek izi direnciyle alakalıdır [6].

2.5.3. Modifiye Lottman (AASHTO T-283) Deneyi

Bitümlü sıcak karışımların yol kaplamasında kullanılabilirliğini tespit etmek amacıyla yapılan en önemli çalışmalardan birisi karışımın suya karşı hassasiyetinin ölçülmesidir. AASHTO T-283 deneyi, sıkıştırılmış bitümlü sıcak karışımların suyun etkilerine karşı hassasiyetlerinin belirlenmesi amacı ile yaygın olarak kullanılan bir deneydir. Lottman tarafından 1970'li yıllarda geliştirilen deney şartları üzerinde bazı değişiklikler yapılarak modifiye edilmiş ve AASHTO tarafından standart hale getirilmiştir. Deneyle, karışımın sudan dolayı meydana gelen dayanım kaybı tespit edilmektedir. Elde edilen sonuçlar, sıcak karışımların yol üzerindeki uzun dönem servis süreçlerinde, soyulmaya karşı hassasiyetlerinin belirlenmesinde kullanılmaktadır [6].

Sıkıştırılmış asfalt numuneler, kuru ve şartlandırılmış (yaş) olmak üzere iki guruba ayrılmakta ve bu iki grup numune dolaylı çekme deneyine tabi tutularak karışımın dayanım kaybı belirlenmektedir. Karışımın dolaylı çekme mukavemetinin alınmasının sebebi, sıcak karışım aşınma tabakaların sürekliliği için en önemli parametrelerden birinin, sıcak karışımın çekme dayanımı olmasıdır. Bu dayanımın düşük olması halinde karışım, trafik ve çevre etkileri ile oluşan çekme gerilmelerine karşı koyamayarak bozulmaktadır [5].

Deneye tabi tutulacak her test gurubu için 3 adet kuru ve 3 adet şartlandırılmış olmak üzere en az 6 adet Marshall numunesi hazırlanmaktadır. Hazırlanan sıkıştırılmamış karışım numuneleri tepsilere konarak oda sıcaklığında 2 saat soğutulduktan sonra 60°C'deki fırına yerleştirilerek 16 saat bekletilir. Sıkıştırma sıcaklığında 2 saat bekletilen karışım numuneleri %6-8 hava boşluklarında sıkıştırılır ve 24 saat oda sıcaklığında bırakılır. Şartlandırmaya tabi tutulmayacak kuru numuneler 25°C'deki su banyosunda 2 saat bekletildikten sonra dolaylı çekme deneyine tabi tutularak kırılır. Şartlandırılacak numunelere ise 13-67 kPa emme basıncı altında 5-10 dakika süreyle bir manometre ile vakum uygulanarak %70-80 oranında su ile doymun hale gelmesi sağlanır. Doymun hale getirilen Marshall numuneleri 16 saat süreyle -18°C'deki buzluğa yerleştirilir. Buzluktan çıkarılan numuneler 60°C'deki su banyosunda 24 saat bekletildikten sonra çıkarılarak 25°C'deki su banyosuna yerleştirilir ve 2 saat bekletildikten sonra dolaylı çekme deneyine tabi tutulur [6,10]. Şartlandırılmış numunelerin dolaylı çekme mukavemetinin (ITSyaş), şartlandırılmayan (kuru) numunelerin dolaylı çekme mukavemetine (ITSkuru) oranıyla eşitlik (2.4) yardımıyla hesaplanmaktadır [6,10,23].

$$ITSR = \frac{ITS_{yaş}}{ITS_{kuru}} \times 100 \quad (2.4)$$

Burada;

ITSR: Dolaylı çekme mukavemeti oranı (%),

ITSyaş: Şartlandırılmış (yaş) gurubun ortalama dolaylı çekme mukavemeti (kPa),

ITSkuru: Şartlandırılmamış (kuru) gurubun ortalama dolaylı çekme mukavemeti (kPa).

Bitümlü sıcak karışımın su etkilerine karşı yeterli dayanımda kabul edilebilmesi için Superpave karışım dizayn metoduna göre ITSR değerinin en az %80 olması istenmektedir [6,10]. Ancak, orijinal Lottman metodunda bu değer en

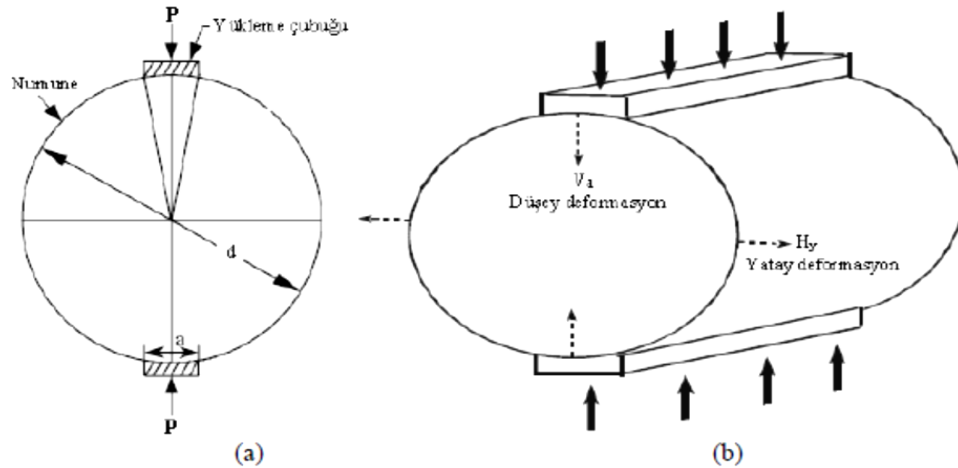
az %70 olması yeterlidir. Deneyde %80'den daha düşük ITSR değerine sahip sıcak karışımların su etkilerine karşı yeterli dayanıklılığa sahip olmadığı kabul edilerek karışımın suya karşı direncinin artırılması istenmektedir. Karışımın su etkilerine karşı direncinin artırılması için genellikle soyulma önleyici katkı maddeleri ilave edilmekte ve katkı kullanılarak modifiye edilen karışımlarda ise ITSR değerinin %85 değerinden az olmaması istenmektedir [6,10].

2.5.4. Dolaylı Çekme Esneklik Modülü (ITSM) Deneyi

Bitümlü karışımların dinamik yükler altındaki esnekliğini tespit etmek amacıyla dolaylı çekme esneklik modülü (ITSM) deneyi yapılmaktadır. Esneklik modülü, bitümlü kaplamalarda kaplamanın yük dağıtma kabiliyetinin bir ölçüsü olarak kabul edilir. Esneklik modülü trafik etkisiyle kaplamanın altında meydana gelen ve yorulma çatlaklarına neden olan çekme ve basınç gerilmelerinin neden olduğu kalıcı deformasyonları kontrol eder. Tek eksenli yükleme altında elde edilen esneklik modülü, genel olarak maksimum gerilmenin maksimum birim şekil değiştirmeye oranı olarak alınır [6,11].

Tekrarlı yüklemeli dolaylı çekme deneyi yardımıyla laboratuvarında hazırlanmış ya da araziden alınan karot numunelerinin esneklik modülü değeri saptanmaktadır.

Deney farklı sıcaklıklarda ve farklı yükleme süreleri altında yapılmakta ve numunelere ait esneklik modülü değerleri belirlenmektedir [6,11]. ITSM deneyi ile esneklik modülü değerinin belirlenmesinde, numunelere yarı sinüzoidal bir formda, Şekil 2.23'de görüldüğü gibi düşey yönde basınç yükü, tekrarlı darbeler şeklinde uygulanmaktadır [11].



Şekil 2.23. Dolaylı Çekme Deneyi (a) ve Şematik Görünüşü (b)

Deney sonucunda, numuneye uygulanan dinamik yük ve bu yükün neden olduğu toplam yatay deformasyonu ölçülür, karışım için bir poisson oranı alınarak numunenin esneklik modülü (E_m) eşitlik (2.5) ile yardımıyla hesaplanır [6,11]

$$E_m = \frac{P \times (v + 0,2734)}{H_y \times h} \quad (2.5)$$

Burada;

E_m : Esneklik modülü (Mpa)

P : Maksimum yük (N)

H_y : Toplam yatay deformasyon (mm)

H : Numune kalınlığı (mm)

v : Poisson oranı

Sıcaklık, yükleme frekansı veya hızı ve karışımın hava boşluğu BSK'nın esneklik modülünü etkileyen en önemli faktörlerdir. Esneklik modülü düşük sıcaklık, yüksek yükleme hızı ve yüksek viskoziteli bitüm kullanımıyla artmaktadır. Esneklik modülü, ayrıca deneyde kullanılan numunenin büyüklüğüne ve poisson oranına göre farklılık gösterdiğinden 100 mm ve 150 mm'lik numunelerin poisson oranları aşağıdaki eşitlik (2.6) ve (2.7) yardımıyla hesaplanır [6].

$$v = 3,59 \times \frac{H_y}{V_d} - 0,27 \quad (100 \text{ mm'lik numuneler için}) \quad (2.6)$$

$$v = 4,09 \times \frac{H_y}{V_d} - 0,27 \quad (150 \text{ mm'lik numuneler için}) \quad (2.7)$$

Burada;

H_y : Yatay deformasyon (mm),

V_d : Düşey deformasyon (mm),

v : Poisson oranı.

Yapılan çalışmalarda, poisson oranının bitümlü karışımlar için sıcaklığa bağlı olarak; 5°C'de 0,25; 25°C'de 0,35; 40°C'de 0,40 olarak değiştiği görülmüştür.

Ancak; çalışmalarda bitümlü karışımın esneklik modülünün tayininde genel olarak 0,35 oranının alınması tavsiye edilmektedir [6].

Şekil 2.24'de ITSM deney cihazı gösterilmektedir.



Şekil 2.24. ITSM Deney Cihazı

2.5.5. Kalıcı Marshall Stabilitesi (Retained Marshall) (RMS)

Kalıcı Marshall stabilitesi deneyi, bitümlü sıcak karışımların nem hasarına karşı dayanımlarının tayini için yapılmaktadır. Kalıcı Marshall stabilitesinde numuneler $60 \pm 1^\circ\text{C}$ sıcaklıktaki su banyosunda 24 saat bekletilip Marshall stabilite deneyine tabi tutulmaktadır. 60°C suda 24 saat süre boyunca bekletilen numunelerin stabilite değerinin tespit edilen normal stabilite değerine oranlanmasıyla Kalıcı Marshall Stabilitesi (RMS) belirlenmektedir. Kalıcı Marshall stabilitesi değeri yüksek olan karışımların nem hasarına karşı dayanımlarının da yüksek olduğu bilinmektedir [21].

2.5.6. Statik Yüklemeli Sünme Modülü Deneyi

Statik sünme modülü deneyi, BSK'ların statik yükler altındaki dayanımlarını tayin etmek için numune üzerine bir yük uygulayıp, yük kaldırıldıktan sonra oluşan kalıcı deformasyonun ölçülmesi ile elde edilmektedir [6]. Bu deneyde, yoğun gradasyonlu sıcak karışımların dairesel ve tek eksenli basınç yüklemesi altında sünme modülü değeri belirlenir. Ayrıca bu değer BSK'ların tekerlek izi oluşumuna karşı dirençlerinin bir göstergesidir. Bu deneyden elde edilen sünme modülü değeri, ısı ve dingil yükleriyle karşılaşan sıcak karışımların düşük sıcaklıktaki çatlama potansiyeli ya da tekerlek izinin hesaplanması ve sertliğinin tahmininde kullanılmaktadır [6].

Standart deney sıcaklığı 40°C olmasına karşın aşırı sıcak bölgeler göz önünde bulundurularak daha yüksek sıcaklıklarda da deney uygulanabilmektedir [6,23]. Deney esnasında 1 saatlik bir süre boyunca numuneye belirli bir statik eksenel

gerilme (σ) uygulanarak, deney esnasında zamanın bir fonksiyonu olarak eksenel deformasyonlar ölçülmektedir. Böylece numunenin ilk yüksekliği belli olduğuna göre eksenel şekil değiştirme, ϵ ve uygulanan gerilmenin bilinmesi dolayısıyla, sıcaklık ve yükleme zamanına bağlı olarak sertlik modülü (R_m), eşitlik (2.8) yardımıyla saptanmaktadır [6].

$$R_m = \sigma / \epsilon \quad (2.8)$$

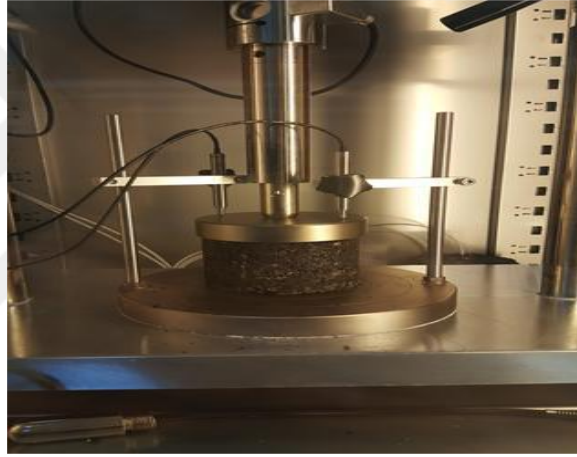
Burada;

R_m : Sünme sertliği modülü (MPa),

σ : Uygulanan gerilme (MPa),

ϵ : Toplam kalıcı eksenel deformasyon (mm).

Şekil 2.25'te sünme deneyi uygulanan numune gösterilmiştir.



Şekil 2.25. Sünme Deneyi Uygulanan Numune

2.6. Bitümlü Sıcak Karışımlardan Beklenen Özellikler

BSK ile elde edilen kaplamaların kalitesi, sahip oldukları özelliklerine doğrudan bağlı olduğundan bu özelliklerin iyi bilinmesi gerekmektedir. Bu yüzden karışımların stabilite, işlenebilirlik, durabilite, geçirimsizlik, yorulmaya karşı direnç, esneklik ve kaymaya karşı direnç özellikleri kaplamanın performansı açısından büyük önem taşımaktadır [6].

2.6.1. Bitümlü Sıcak Karışımların Stabilitesi

Kaplamanın trafik yükü, sıcaklık, çevresel faktörlere karşı gösterdiği direnç olarak adlandırılan stabilitenin tüm trafik yüklerini ve çevresel faktörleri karşılayabilmesi gerekir. Öte yandan çok yüksek stabilite de istenmeyen bir

durumdur ve yüksek stabiliteye maruz kalan kaplamaların trafik yükleri altında çatladığı görülmektedir [6]. Karışımın stabilitesi agregalar arasındaki içsel sürtünmeye ve bağlayıcının kohezyonuna bağlıdır. Agregalar arasındaki içsel sürtünme agregaların şekilleri ve yüzey dokularıyla ilgiliyken, kohezyon ise yükleme hızı (trafik hızı) ve asfalt bağlayıcının viskozitesi arttıkça artar, kaplamanın sıcaklığı arttıkça azalır [24].

2.6.2. Bitümlü Sıcak Karışımların Durabilitesi

Bir asfalt kaplama karışımının, hava, su, sıcaklık ve trafiğin aşındırıcı etkilerine karşı koyma yeteneğini gösteren bir özelliktir. Bu etkiler arasına, asfalt bünyesindeki oksidasyon ve buharlaşma gibi değişiklikler ile suyun donma çözülme etkisi dolayısıyla kaplama ve agregada üzerinde meydana gelen değişiklikler de eklenebilir. Dayanıklılık özelliği, genellikle yüksek asfalt içeriği, yoğun veya iyi derecelenmiş agregada gradasyonu ve iyi sıkıştırılmış geçirimsiz karışımlar sayesinde iyileşmektedir [6].

Yüksek durabilite, yüksek asfalt yüzdesi kullanılarak, yoğun gradasyonlu, soyulma düzeyi yüksek agregada kullanılarak ve karışım en yüksek geçirimsizlik verecek şekilde dizayn edilip sıkıştırılarak sağlanır [25].

2.6.3. Bitümlü Sıcak Karışımların Geçirimsizliği

Bağlayıcının geçirimsizliği, karışımın içindeki hava boşluğu yüzdesiyle saptanmaktadır. Hava boşluğu, kaplamaya su ve havanın girişine neden olsa da, bu boşlukların sayısından çok, boşlukların karakterleri yani boşlukların boyutu, boşlukların birbiri ile bağlantı seviyeleri ve bunların kaplama yüzeyine ulaşım ulaşmadıkları geçirimsizlik için daha önemlidir [26].

Düşük asfalt içeriği ve karışımındaki yüksek boşluk oranı tabakayı çok geçirimli hale getirir. O nedenle karışımlar belirli orandaki esnekliği sağlayacak boşluk yüzdesine göre tasarlanmalıdır [5].

2.6.4. Bitümlü Sıcak Karışımların İşlenebilirliği

İşlenebilirlik, karışımın hazırlanıp serilmesi ve sıkıştırılması esnasındaki kolaylık olarak ifade edilebilir. Kaba agregada miktarı ve agregada maksimum dane boyutu, kırmataş agregada kullanılması ve agreganın yüzey pürüzlülüğü, asfaltın katılığı veya viskozluğu, mineral filler miktarı ve ara boyutlu malzeme miktarı

özelliklerinin artmasıyla ve karışım ısısının düşmesiyle işlenebilirlik değişmektedir. İşlenebilirliği düşük olan karışımlar, serme ve özellikle sıkıştırma zorlukları doğuracaklarından, genellikle homojen olmayan ve stabilitesi düşük olan kaplamalar elde edilmektedir [6].

2.6.5. Bitümlü Sıcak Karışımların Esnekliği

Esneklik, kaplamanın geçici oturma hareketlerine karşı, herhangi bir çatlama ve deformasyon oluşturmada uyum gösterme özelliğidir. Esnekliği karışımdaki agrega gradasyonu, bitümün yüzdesi etkilemektedir [5]. Kaplamanın esnekliğindeki artış, stabilitedeki azalma anlamına gelmektedir [6].

2.6.6. Bitümlü Sıcak Karışımların Yorulmaya Karşı Direnci

Trafik yüklerinin neden olduğu deformasyona karşı gösterilen direnç yorulmaya karşı gösterilen tepki olarak ifade edilir. Boşluk yüzdesi ve asfaltın viskozite değerleri yorulmayı etkileyen faktörlerdir. Yorulma ömrü, genel olarak karışımın boşluğu azaldıkça, rijitliği ve kalınlığı arttıkça ve asfalt miktarı ve yumuşaklığı arttıkça artış göstermektedir [5].

2.6.7. Bitümlü Sıcak Karışımların Kaymaya Karşı Direnci

Kaplamanın ve üzerinde bulunan taşıtların, her türlü hava koşullarında uygun mesafede durabilmeleri için kaplamanın için yeterli sürtünmeye sahip olması gerekmektedir. Kayma direnci genel olarak; düşük asfalt miktarı, cilalanma direnci yüksek, kırmataş ve pürüzlü yüzeyli agrega yoğun gradasyonlu karışım kullanılmasıyla artmaktadır. Asfalt kaplamaların kayma direnci makro ve mikro pürüzlülüğüne bağlıdır. Mikro pürüzlülük agreganın yüzey yapısına bağlı iken makro pürüzlülük asfalt karışımında kullanılan agreganın nominal boyutu ile ilgilidir [5].

Çizelge 2.6'da bitümlü sıcak karışımların temel özelliklerine etki eden parametreler verilmiştir.

Çizelge 2.6. Bitümlü Sıcak Karışımların Temel Özelliklerine Etki Eden Parametreler [5]

Karışım Özelliği	Bağlayıcı		Agrega				Yoğunluk (Sıkışma)		Isı		Yükleme Hızı		Kaplama Kalınlığı	
	Miktar		Katılık		Yoğunluk		Agrega Tipi							
	Fazla	Az	Katı	Yumuşak	Çok Yoğun	Az Yoğun	Köşeli Pürüzlü Poroz	Yuvarlak Cilalı Az poroz						
Stabilite			x		x		x			Çok	Az			
Rijitlik			x		x		x					x		
Dayanıklılık	x		x		x		x					x		
Yorulma Mukavemeti	x			x	x		x		(6)			x		
Esneklik	x			x		x		x						
Geçirgenlik	x		x		x			(5)						
Kayma		x	x			x	x							
Direnci														
İşlenebilirlik		(3)		x		x		x						

Notlar:

1. Asfalt yüzdesi optimum civarında ancak, optimumdan daha az ise yüksek stabilite, aksi takdirde düşük stabilite elde edilir.
2. Asfalt katı ve ısı düşük ise fazla asfalt yüzdesinde, aksi halde az asfalt yüzdesinde oluşur.
3. Genel olarak az asfalt yüzdesinde olur.
4. Isının dayanıklılık üzerindeki etkisi; Isı çok yüksek ise soyulma, ısı çok düşük ise bütülme çatlakları artar.
5. Genel olarak geçirimsizlik yoğunluk ile artar.
6. Isının yorulma mukavemeti üzerinde direkt etkisi yoktur.
7. Düşük ısıda karışımın boşluk oranı, tasarım boşluk oranı civarındadır

2.7. Bitümlü Sıcak Karışımlarda Meydana Gelen Bozulmalar

Bitümlü sıcak karışım kaplamalar, ilk inşa edildiklerinde çok iyi dizayn edilseler dahi trafiğe açıldıktan sonra iklim, çevre ve trafik koşulları altında belirli bir süre sonra bozulmaya başlarlar. Yol üstyapılarında meydana gelen bozulmaların başlıca nedenleri arasında tasarım, yapım ve bakım hataları, kötü malzeme seçimi, iklim koşullarının ağırlığı ve denetimsiz seyreden aşırı yüklü kamyonlar olduğu gözlenmiştir [5]. Asfalt kaplamalarda oluşan bu bozulmaları deformasyon, çatlamlar ve ayrışmalar olarak üç grupta sıralanabilir.

2.7.1. Deformasyonlar

Deformasyon, asfalt kaplama tabakalarının inşa edildikten bir süre kaplamanın bir bölümü veya tamamında görülebilen şekil değiştirmeler olarak tanımlanabilir. Çoğu araştırmacı, asfalt mühendisliği ile ilgili çalışmalarda öneminden dolayı, çalışmalarını esnek kaplamalarda meydana gelen kalıcı deformasyonlar (oluklanma ya da tekerlek izi) üzerinde yoğunlaştırmışlardır. Kalıcı deformasyonlar, kaplamanın servis yeteneğinde azalmaya neden olmaktadır [30].

Deformasyonlar genel olarak düşük stabiliteli bitümlü sıcak karışımların imalatından kaynaklansa da; kaplama tabakalarının yetersiz sıkıştırılması, aşınma tabakasında aşırı filler ve bitümlü bağlayıcı kullanımı, alt tabakalarda ve zeminde aşırı hacim değişikliği olması, yetersiz tabaka kalınlığı ve yetersiz drenaj gibi nedenlerden etkilenmektedir [3].

Deformasyonları oturmalar, yerel çökmeler, tekerlek izi oluşması, ondülasyonlar, kabarmalar, yığılmalar ve lastik deseni oluşması olarak bölümlere ayrılmaktadır.

2.7.1.1. Tekerlek izi oluşumu

Tekerlek izi oluşumu, özellikle sıcak havalarda ve ağır taşıt trafiğinin yoğun olduğu yollarda çok sık karşılaşılan, kalıcı deformasyonun en yaygın şeklidir ve birçok sebepten kaynaklanmaktadır. Bu sebepler arasında ağır trafik yükü ve tekerrür sayısının fazlalığı, ağır taşıtların hızı, yüksek hava sıcaklığı ve düşük viskoziteli asfalt, temel tabakası kalınlığı ve zemin mukavemetinin yetersizliği, aşırı asfalt ve filler yüzdesi, yuvarlak dere malzemesi kullanımı ve yetersiz sıkıştırma olarak sıralanabilir. Kalıcı

deformasyona sebep olan tekerlek izi oluşumu Şekil 2.26’da görüldüğü gibi genellikle ağır trafiklerin hareket ettiği şeritte meydana gelmektedir [12].



Şekil 2.26. Tekerlek İzi Oluşumu [12]

2.7.1.2. Oturmalar ve çökmeler

Oturmalar, kaplama altındaki alt tabakalarda meydana gelen bozulmaların satha yansması olup bitümlü kaplamaya bağlı değildir. Bunlar 0,5–2 m yarıçaplı dairesel veya daireye yakın boyutta oluşur ve bitümlü tabakalar esneklikleri sayesinde genellikle çatlamadan alt tabakaların yeni kotuna ulaşabilir fakat, kırılğan asfalt kaplamalarda çatlamalar görülür [6]. Oturmaların nedenleri; alt tabakaların yetersizliği, yetersiz sıkıştırma, üstyapı tabanının taşıma gücünün zayıf olması, dolgu şevinde hatalar, yer altı su seviyesinin yüksekliği, yetersiz drenaj, uygun olmayan bakım teknikleri şeklinde sıralanabilir [27].

Çökme, orjinal kaplama yüzeyine göre düşük kotta kalmış küçük çukurluklardır. Derinlikleri 2,5 cm ya da daha fazla olabilmekte ve yağmurlardan sonra içlerine su dolmaktadır. Temel ve alttemel tabakalarının stabilite yetersizliği, yetersiz sıkıştırma, yetersiz drenaj, kaplamanın taşıyabileceğinden daha ağır trafik yükü ile karşılaşması, kötü işçilik ve yapım hataları çökmenin oluşma nedenleri olarak sıralanabilir [27].

2.7.1.3. Ondülasyonlar ve kabarmalar

Ondülasyonlar, yol üzerinde trafiğin akışına göre enine doğrultuda oluşan ve belirli biçimde dalgaya benzeyen, plastik bir hareket sonucu oluşan kaplama deformasyonlarıdır. Bu tip deformasyonlar kavşaklar, otobüs durakları, tırmanma şeritleri gibi kesimlerde ondülasyon şeklinde görülür. Genel olarak düşük stabiliteli karışım, yetersiz tabaka kalınlığı, düşük viskoziteli asfalt, aşırı asfalt miktarı, rutubet

miktarı, zayıf yapıştırma tabakası ve ağır taşıtların yoğun durma-kalkma hareketi gibi nedenlerden kaynaklanmaktadır. Kabarmalar ise kaplamanın bir bölgede yukarıya doğru hareket etmesidir. Bu hareket oluşum nedeni genel olarak tabii zeminin ve üst tabakaların şişmesiyle ortaya çıkmaktadır [5].

2.7.2. Çatlamlar

Çatlamlar, kaplama yüzeyinde trafik, çevre ve iklimin etkisi ile çok çeşitli şekilde, genişlikte ve derinlikte oluşan kusurlardır. Çatlaklar genel olarak stabilite, yorulma ve yansıma çatlakları olarak sınıflandırılır. Stabilite çatlakları, trafik yüklerinin etkisi ile kaplamanın altında oluşan çekme gerilmelerinin, kaplamanın çekme mukavemetini aşması halinde tabakanın alt kısmında başlamakta ve zamanla kaplama yüzeyine çıkması ve düşük ısı çatlaklarının trafiğin etkisiyle büyüyerek belirgin hale gelmesi sonucu oluşmaktadır (Şekil 2.27). Yorulma çatlakları ağır trafik yüklerinin tekrarı ile kaplamanın yorulma mukavemetini aşması sonucu oluşmaktadır. Yansıma çatlakları ise bozulmuş bir kaplamanın üzerine yeniden bir kaplama yapıldığında, alttaki tabakada oluşmuş çatlakların üstteki tabakaya kadar ilerlemesidir. Esnek kaplamalarda çoğunlukla yorulma çatlakları oluşmaktadır [5].



Şekil 2.27. Tipik Bir Esnek Üstyapısı (a) ve Oluşan Bozulmalar (b) [29]

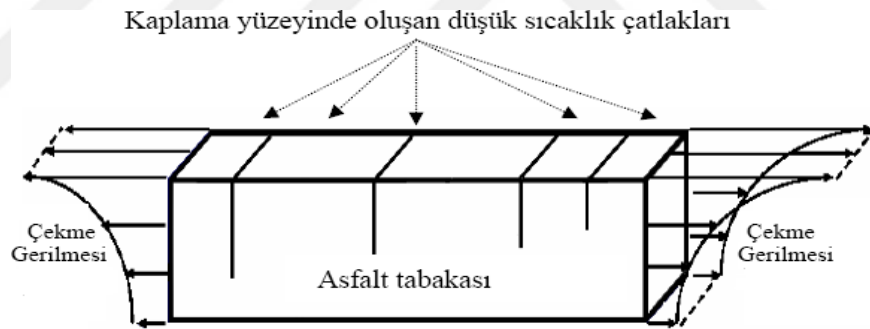
2.7.2.1. Yorulma Çatlakları

Yorulma çatlağı, asfalt kaplamalara uygulanan tekrarlı ağır tekerlek yüklerinden dolayı, çatlak oluşumuna sebebiyet verecek şekilde kaplamanın çekme gerilme dayanımının aşılması ile oluşur. Yorulma çatlağı oluşumunun ilk belirtisi, trafik yönünde aralıklı olarak boyuna tekerlek izi çatlaklarının meydana gelmesidir. Oluşan aralıklı boyuna çatlaklar zamanla birleşerek, ardından bu çatlaklar enine çatlakların oluşmasına neden olarak haliyle daha fazla çatlağın oluşumuna sebep

olması nedeniyle, kaplamada artan bir bozulma türüdür. Yorulma çatlakları genellikle ağır dingil yükleri ve fazla miktarda yük tekrarı, kaplama veya kaplama altındaki tabakaların yetersiz kalınlığı, tabakalardaki hacim değişiklikleri ve yetersiz drenaj gibi nedenlerle oluşmaktadır [6].

2.7.2.2. Düşük Sıcaklık Çatlakları

Düşük sıcaklık çatlakları, trafiğin etkilerinden çok, soğuk iklimli havalarda asfalt kaplamanın büzülmesi sonucu kaplamada artan çekme gerilmelerinin oluşturduğu, trafik akışına dik olarak meydana gelen enine doğrultudaki çatlaklardır. Kış şartlarında büzülmeye çalışan kaplama yüzeyinde büyük çekme gerilmeleri oluşur ve bu tekrarlı çekme gerilmeleri, kaplamanın çekme mukavemetini aştığında, Şekil 2.28’de görüldüğü gibi yüzeyde çatlaklar meydana gelir. Bu çatlakların en önemli nedeni asfaltın kıvamı ve sıcaklığa olan duyarlılığıdır. Düşük sıcaklıklarda rijit bir davranış gösteren asfalt, çekme gerilmesi altında deformasyon göstermeden kırılma gösterir.



Şekil 2.28. Kaplama Gerilme Durumu ve Düşük Sıcaklık Çatlakları [30]

Karışımında kullanılacak asfalt miktarı, asfaltın yaşlanması, karışımın rijitliği, hava sıcaklığı ve çok soğuk gün sayıları, kaplama kalınlığı ve tabakalar arasındaki sürtünme kuvvetleride çatlak oluşumuna sebep olmaktadır [5,6].

2.7.3. Kuma

Yol kaplamasını oluşturan bitümün sıcaklıktan dolayı kaplamanın yüzeyine doğru yükselerek yüzeyde kalın bir film tabakası oluşturması durumuna kuma denir. Oluşan film tabakasından dolayı yüzeyin sürtünme katsayısı azalmaktadır [31].

Kusma daha ziyade asfalt yüzdesi yüksek karışımlarda ve sıcak havalarda ortaya çıkar. Çok ağır dingil yükleri altında da asfalt yüzeye çıkabilir. Asfalt yüzdesi optimum olmakla beraber, karışımda boşluk yüzdesi çok düşükse, sıcak havalarda genleşen ve boşluk bulamayan asfalt yine yüzeye çıkma eğilimi gösterecektir. Astar veya yapıştırma tabakalarının çok kalın serilmeside kusmaya sebep olabilir. Karayollarımızın bakım görmüş kesimlerinde görülen kuma, bağlayıcı ve boşluk yüzdeleri dikkatli seçilmesiyle önlenabilir [32].

Yapılan çalışmalarda agrega gradasyonundaki ince malzeme miktarının kuma olayında etkili olduğu, kuma miktarının sıcaklık, trafik yükü ve bitüm miktarı arttıkça arttığı tespit edilmiştir [33].

2.7.4. Ayırışmalar

Bu tip bozulmalar aşınma tabakasının trafik ve iklim etkisi ile küçük parçalar halinde ayrışması sonucu kopma ve parçalanma şeklinde görülür ve aşınma tabakasından agrega danelerinin koparak ayrılmasından kaynaklanır. Ayırışmalar genel olarak yapım hataları, düşük kaliteli malzeme kullanımı, kirli ve ıslak agrega kullanımı, hatalı serim ve sıkıştırma ve yetersiz asfalt veya yetersiz adezyon gibi nedenlerden oluşur [5].

2.7.4.1. Dağılmalar ve sökülmeler

Asfalt kaplamalarında dağılma, karışımda bulunan agregaların ufalanması sonucu agrega tanelerinin küçük çukurlar bırakarak sökülmesiyle meydana gelir. Sökülmeler önce ince agregaların kaplamadan ayrılmasıyla başlar ve sonraki aşamada iri agrega tanelerinin ayrılması ile devam eder. Dağılma ve sökülmelerin en önemli nedenleri ise karışımda kullanılan agregaların temiz olmaması ve soğuk hava koşullarında yapım olarak sayılabilir [31].

2.7.4.2. Soyulma

Bitümlü sıcak karışımlarda kullanılan bitümün, agregaların etrafını film şeklinde sarması istenir. Fakat kaplamalarda zamanla trafik yüklemeleri, su ve kil etkisi ile bu film tabakası agregadan ayrılarak çıplak kalmasına neden olur. Ülkemizde soyulma olayı çok gerçekleşmediğinden dolayı bugün için büyük bir sorun haline gelmemiştir [31].

2.8. Bitümlü Sıcak Karışımlarda Kullanılan Dizayn Yöntemleri

Yol üstyapılarının tasarımından amaç, üstyapının yapım maliyeti ve hizmet süresi boyunca yapılacak bakım masraflarını minimize ederken, trafik yüklerini etkin bir şekilde dağıtabilen bir mühendislik yapısı inşa etmektir [13].

Üstyapı tasarımında, 1930'lu yıllardan beri günümüze kadar kullanılmış ve hala kullanılmaya devam eden Marshall ve Hveem olmak üzere iki karışım tasarım yöntemi bulunmaktadır. Marshall Metodu, istenilen yoğunluk, stabilite ve akma değerlerini sağlama kriteri ile optimum bitüm oranı tayininde kullanılmaktadır. Marshall yöntemi, eksikliklerine rağmen belki de dünyanın en yaygın olarak kullanılan karışım tasarımı yöntemidir. Karayollarında özellikle yetmişli yıllardan başlayarak artan taşıt miktarı ve dingil ağırlıkları, o ana kadar uzun ve tatminkâr performans sağlayan bitümlü karışımların, ağır dingil yükleri altında deformasyona uğraması dolayısıyla geleneksel Marshall ve Hveem tasarım yöntemlerinin günümüz gelişmiş teknolojisi paralelinde gelişen ağır trafik yüklerine maruz yollar için çok uygun olmayabileceği öne sürülmektedir [6].

Bu yüzden, A.B.D.'de yüksek sıcaklıklar ve ağır taşıt yükleri için Marshall yönteminin geliştirilmesi ile günümüz trafiğinin gereksinimlerini geniş çapta yerine getirmeye çalışan, her türlü hava şartlarında yolun performansını koruyarak hizmet vermesini sağlayan Üstün Performanslı Asfalt Kaplama (Superpave) yöntemi geliştirilmiştir. Bu yöntemde Marshall tasarım yönteminden farklı olarak agrega ve bitüm seçiminde uygulanacak bölgenin trafik yükü ve sıcaklık değerleride dikkate alınmaktadır [6].

3. BİTÜM VE BİTÜMLÜ KARIŞIMLARIN MODİFİKASYONU

Esnek kaplamaların stabilite ve performans yönünden nitelikli, uzun ömürlü ve bakım-onarım maliyetinin düşük olması amaçlanmaktadır. Kaplamaların bu özelliklere sahip olabilmesi kaplamanın ömrünü etkileyen bazı özelliklerinden kalıcı deformasyonlarının, yorulma ve düşük ısı çatlaklarının, su etkisiyle soyulmasının ve düşük durabilitelerinin en aza düşürülmesi gerekmektedir. Bu sebeple modifikasyon işlemi gerçekleştirilerek gerek asfalt bağlayıcının gerekse bitümlü karışımın performansını arttırmak için çalışmalar yapılmaktadır.

Modifikasyon; bağlayıcının ve bitümlü karışımların performanslarını artırmak için, modifiyer olarak kullanılacak katkıların belli miktarlarda ya bitüm içerisine veya bitümlü bağlayıcı karışım içerisine ilavesiyle yapılmaktadır. Bu şekilde elde edilen asfalta ‘Modifiye Asfalt (MA)’ ve karışıma ise ‘Modifiye Edilmiş Karışım’ denilmektedir [3].

3.1. Modifikasyonun Amacı

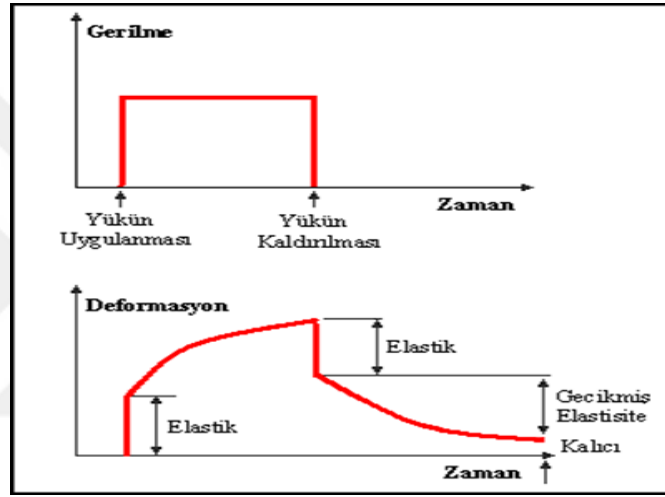
Bitüm ve bitümlü karışımların modifiye edilme nedenlerini şöyle sıralanabilir [6]:

- ◆Düşük servis sıcaklıklarında çatlakları en aza indirmek için daha esnek bitümlü karışımlar oluşturmak,
- ◆Yüksek sıcaklıklarda daha rijit karışımlar oluşturarak tekerlek izi oluşumunu en aza indirmek,
- ◆Kayma direnci yüksek kaplama yüzeyleri elde etmek,
- ◆Karışımların işlenebilirlik, direnç ve dayanım özelliklerini artırmak,
- ◆Kaplamanın stabilite, mukavemet ve yorulma direnci özelliklerini arttırmak,
- ◆Düşük kaliteli agregaları ve bağlayıcıları karışımlarda kullanılır hale getirebilmek,
- ◆Agrega ve bağlayıcı arasındaki adezyonun artmasıyla soyulmayı azaltmak,
- ◆Kaplama oluşmuş kusmayı ya da terlemeyi azaltmak,
- ◆Bağlayıcının yaşlanmaya karşı direncini arttırmak,
- ◆Kaplama tabakasının daha ince yapılmasını sağlamak,
- ◆Her bakımdan kaplama performansını yükselterek, uzun vadede kaplamanın ekonomik olmasını sağlamak.

3.2. Katkı Maddelerinin Bitümlü Karışımlardaki Rolü

Bitüm, reolojik yapı olarak visko-elastik özellik gösterdiğinden dolayı, başta kalıcı deformasyon ve çatlamaya karşı gösterdiği direnç olmak üzere kaplama performansının birçok özelliğinde önemli rol oynayarak bitümlü karışımların da visko-elastik özellik göstermelerine sebep olmaktadır. Genel olarak, bitümlü bir malzemede oluşan deformasyon miktarı, yükleme süresine ve sıcaklığa bağlı olarak değişiklik göstermektedir [6].

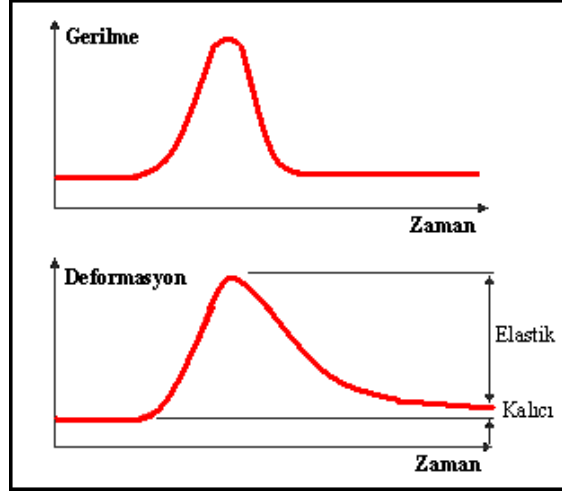
Bitümlü bir malzemeye uygulanan yük sonucunda oluşan gerilme ve deformasyonların zamanla değişimi Şekil 3.1’de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Bitümün Statik Yükler Altındaki Visko-Elastik Davranışı [6]

Şekil 3.1’de, bitümlü bir malzemenin statik yüklere karşı tepkisini göstermektedir. Yük uygulanmasıyla birlikte meydana gelen şekil değiştirme, anlık bir elastik tepki şeklinde olmakta ve ardından yük ortadan kaldırılana kadar kademeli bir artış göstermektedir. Deformasyondaki bu değişim malzemenin viskoz özelliğinden kaynaklanmaktadır. Yükün kaldırılmasıyla elastik deformasyon ani olarak geri dönmekte ve zaman geçtikçe de bir miktar daha toparlanma olmaktadır. Bu durum “gecikmiş elastisite” olarak adlandırılmakta ve sonuçta geri kazanılamayan bir miktar kalıcı deformasyon meydana gelmektedir [6].

Bitümlü bir malzemenin hareketli araç tekerleklerinden oluşan bir dinamik yüklemeye karşı gösterdiği tepki ise Şekil 3.2’de gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Bitümün Dinamik Yükler Altındaki Visko-Elastik Davranışı [6]

Şekil 3.2’de verilen deformasyon-zaman grafiğinde, yükten önce ve sonra ortaya çıkan değerlere bakıldığında büyük oranda elastik şekil değiştirme ile birlikte küçük miktarda kalıcı şekil değiştirme görülmektedir. Sadece bir tekerlek yükü için gösterilen şekil değiştirme, aslında çok küçük olabilir fakat bunun gibi milyonlarca dingil yükünün uygulanması sonucunda kalıcı şekil değiştirmelerin toplamı büyür ve kaplamada kalıcı deformasyon oluşturur. Yukarıdaki her iki durumda da deformasyonlardaki artış; yüksek sıcaklık, ağır veya hareketsiz trafik etkisiyle olmaktadır [6].

Modifiyerlerin başlıca görevlerinden biri de, bitümün veya bitümlü sıcak karışımın yüksek sıcaklıklar altında kalıcı deformasyona karşı direncini, başka sıcaklıklardaki bitüm veya bitümlü karışım özelliklerini olumsuz yönde etkilemeksizin arttırmaktır. Bu işlem, karışımın toplam visko-elastik tepkisini azaltmak ve bununla birlikte kalıcı şekil değiştirmede azalma meydana getirmek için bitümün sertleştirilmesi, kalıcı şekil değiştirmeyi azaltmak için bitümün elastik bileşenini çoğaltarak viskoz bileşeni azaltarak gerçekleştirilmektedir. Bitümün sertliğinin artmasıyla karışımın da sertliğini artacak ve dolayısıyla malzemenin yük yayma yeteneği ile kaplamanın yapısal mukavemetini ve beklenen tasarım ömrünü iyileştirecektir [6].

3.3. Bitüm Katkı Maddelerinin Sınıflandırılması

Bitüm katkı maddeleri çeşitli şekillerde sınıflandırılmaktadır. Katkı maddesinin tipini, örneklerini ve katkı maddesinin bitüm kıvamına etkisini gösteren genel bir sınıflandırma Çizelge 3.1’de verilmiştir [11]

Çizelge 3.1. Bitüm Katkı Maddelerinin Genel Sınıflandırılması [11]

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

Yaygın olarak kullanılan bazı modifiyerlerin bağlayıcı üzerindeki etkisi Çizelge 3.2’de, bitümlü karışımlara eklenen kimyasal katkıların olumlu etkileri Çizelge 3.3’de verilmektedir.

Çizelge 3.2. Yaygın Olarak Kullanılan Modifiyerlerin Bağlayıcı Üzerindeki Etkisi [11]

Modifiyer	Etkilenmiş Özellik
Yağ	Bitümün yapısı, Bağlayıcılık, Viskozite Penetrasyon değeri, Yumuşama noktası
Filler Tozu	Yumuşama noktası, Viskozite, Sertlik, Yoğunluk, Maliyet, Mekanik sağlamlık
Fiberler	Tiksotropik, Çatlak direnci, Viskozite
Balmumu	Viskozite (sıcak), Sertlik (soğuk), Bağlayıcılık, Adezyon
APP (AtaktikPolipropilen) EVA (Etilen Vinil Asetat)	Sertlik, Penetrasyon değeri Frass kırılma noktası, Yumuşama noktası
SBS (Stren-Butodien-Stren)	Penetrasyon değeri, Yumuşama noktası Elastik geri dönüş, Düşük sıcaklık kırılabilirliği
Solvent	Viskozite
Emülsifikasyon	Viskozite, Islatma kabiliyeti, Uygulama sıcaklığı
Islatma Ajanları	Islatma kabiliyeti, Adezyon

Çizelge 3.3.Bitümlü Karışımlarda Kimyasal Katkıların Olumlu Etkileri [11]

Kimyasal Katkıların Rolü	Kimyasal Katkılar					
	Hidrate Kil	Portland Çimentosu	Manganez Modifiyesi	Katyonik Yüzey Aktif Ajanları	Sülfür	Organik Polimer
Yaşlanma	x			x		
Nem hasarı	x			x		
Agrega bağlayıcı değişikliği			x			
İşlenebilirlik	x	x	x	x	x	x
Adezyon	x	x	x	x		
Stabilite	x	x		x	x	x
Tekerlek izi	x	x	x		x	x
Soyulma	x		x			
Sertlik	x		x		x	

x: Olumlu etki

Günümüzde yaygın olarak kullanılan doğal ve üretilmiş modifiyer çeşitleri ve bu modifiyerlerin bitümlü karışımlarda kullanılması ile oluşabilecek ana kusurları azalttığı ispatlanan, ifade edilen veya iddia edilen sınıflandırması ve muhtemel faydaları Çizelge 3.4’te verilmiştir.

Çizelge 3.4. Yaygın Olarak Kullanılan Asfalt Modifiyerlerin Muhtemel Olumlu Etkileri [6]

Modifiyer Tipi	Sınıfı	Bozulmalara Etkisi				
		KD ¹	YÇ ²	DSÇ ³	NH ⁴	Y ⁵
Fillerler	Siyah karbon	x				x
	Mineral: Sönmüş kireç	x				x
	Uçucu kül	x				
	Portland çimentosu	x				
	Kiremit tozu	x				
Genleştiriciler (Ekstendenler)	Sülfür	x	x	x		
	Odun lignini				x	
Polimerler-Elastomerler	Styrene butadiene di-block SB	x		x	x	
	Styrene butadiene triblock/radial block (SBS)	x	x	x		
	Styrene isoprene (SIS)	x				
	Styrene ethylbutylene (SEBS)					
	Styrene butadiene rubber latex SBR	x		x		
	Polychloroprene latex	x	x			
	Doğal kauçuk	x				
Polimerler-Plastomerler	Ethylene vinyl acetate (EVA)	x	x			
	Ethylene propylene diene monomer (EDPM)	x				
	Ethylene acrylate (EA)	x				
	Polyethylene (low density and high density)	x		x		
	Polypropylene	x				
Ufalanmış kauçuk	Farklı boyutlar, iyileştirmeler ve işlemler	x	x	x		
Oksidanlar	Manganez bileşikleri	x				
Hidrokarbonlar	Aromatikler			x		
	Naftenik					
	Parafmiks/mum			x		
	Vakum gaz yağı			x		
	Asfaltenler: yüksek işlem reçineler	x				
	SDA asfaltenler	x				
	Asfaltenler: DEMEX Asfaltenler	x				
	Shale oil				x	x
	Tall oil					
Soyulma önleyiciler	Doğal asfaltlar: Trinidad	x	x	x	x	
	Aminler: Amidoaminler				x	
	Polyaminler				x	
	Sönmüş kireç				x	
	Organo-metallikler				x	
Fiberler	Polipropilen	x	x	x		
	Polyester	x		x		
	Fiberglass					
	Çelik	x	x	x		
	Güçlendiriciler	x	x	x		
	Doğal: selüloz	x				
	Mineral	x				
Antioksidanlar	Karbamatlar: Kurşun			x		x
	Çinko			x		x
	Siyah karbon	x				x
	Kalsiyum tuzlar					x
	Sönmüş kireç				x	x
	Fenollar					x
	Aminler				x	x
¹ : Kalıcı Deformasyon		⁴ : Nem Hasarı				
² : Yorulma Çatlağı		⁵ : Yaşlanma				
³ : Düşük Sıcaklık Çatlağı		x: Olumlu etki				

3.4. Nanosilika'nın Bitüm ve BSK Modifikasyonunda Kullanımı

İnşaat sektöründe de, bilimin ve diğer mühendislik dallarında olduğu gibi nanoteknolojideki gelişmeler yakından takip edilmektedir. Olası yeni uygulama alanları belirlenmeye çalışılmaktadır. Nanopartiküllerin yapı malzemelerinin üretimi ve özelliklerinin iyileştirilmesinde kullanımı her geçen gün daha da ilgi çekici hale gelmektedir [35].

Nano malzemelerin bitüm modifikasyonunda kullanımı nispeten yenidir. Çok küçük bir boyutu ve büyük yüzey alanı olan nanomateriyallerden az miktarda eklenerek sıradan malzemelerle aynı etki elde edilebilir. Bu amaçla kullanılan nanokil, nanosilika, nanotitanyum, nanohidrate kireç, nano boyutlu plastik tozları veya polimerize tozlar, nano ve nanotüpler olarak bitümü modifiye etmek üzere kullanılan veya bitümün özelliklerini iyileştirme potansiyeline sahip olabilecek çeşitli nanomateriyaller vardır. Bu malzemelerden biri olan nanosilikanın bitüm ve bitümlü karışımlarının özellikleri üzerindeki etkisi çeşitli çalışmalarda incelenmiş ve bunların karışımların fiziksel ve reolojik özelliklerini geliştirmek için kullanılabilecek nano malzemeler arasında olduğu görülmüştür [35].

Santagata ve arkadaşları, bitüm modifikasyonunda nanokil kullanarak yaptıkları bir çalışmada nanokilin düşük bir yüzde yumuşama noktasını arttırdığı ve asfalt bağlayıcı penetrasyonunu ve sünekliğini azalttığını göstermişlerdir. Ayrıca nanokil kullanımının modifiye asfaltın yaşlanmaya karşı daha direnci arttırdığını göstermişlerdir [36].

Ayrıca, Jahromi ve Khodaii, yaptıkları çalışmada nanokilin asfaltın sertliğini arttırdığını ve geleneksel asfalta göre faz açısını azaltarak bağlayıcıların elastikiyet özelliklerini geliştirdiğini tespit etmişlerdir. Çalışmada ayrıca nanokilin bitümün yaşlanma direncini arttırdığı belirlenmiştir [37].

Shafabakhsh ve Jafari, çalışmalarında bitüm modifikasyonu için nanotitanyum (TiO_2) ve nano boyutta silikayı (SiO_2) bir arada kullanarak modifiye karışımlar elde etmişlerdir. Elde edilen modifiye karışımlarla çelik cüruf asfalt karışımlar (SSAM) hazırlamışlardır. Modifiye bitümlü bağlayıcı ve modifiye karışımlar üzerinde çeşitli testler uygulamışlardır. Bu karışımlar üzerinde yapılan laboratuvar testlerinin sonuçlarına bakıldığında, yapılan modifikasyonun penetrasyon derecesini azaltırken, viskoziteyi sırasıyla %30 ve %109 oranında arttırdığını göstermişlerdir [38].

Han ve arkadaşları, yaptıkları çalışmada asfalta %0, %2 ve %4 oranlarında nano kalsiyum karbonat (CaCO_3) ekleyerek modifiye asfalt karışımları hazırlamışlardır. Modifikasyonun asfalt karışımların dinamik davranışı üzerindeki etkisini değerlendirmek için, dinamik sünme, dolaylı gerilme yorulma ve dayanım testleri uygulamışlardır. Elde edilen sonuçlara göre, katkı kullanımının %4 oranına kadar miktarının yorulma direncini azaltabileceği ve sıcak asfalt karışımların yorulma ömrünü artırabileceği göstermişlerdir. Ayrıca, nano CaCO_3 ilavesinin nem hasarı potansiyelini azalttığı, yüksek sıcaklıklara asfalt duyarlılığını arttırdığını gözlemlemişlerdir [39].

Yao ve arkadaşları, asfalt bağlayıcının ağırlıkça %2-4 oranlarında nanosilikayla modifiye edilmesiyle elde ettikleri karışımların tekerlek izi derinliğini neredeyse yarıya azaltmanın mümkün olduğunu göstermişlerdir [40].

Mohd ve arkadaşlarını yaptıkları çalışmayla, ılık asfalt katkı maddesi olan WAA içeren nanokil modifiye bağlayıcıların hazırlanma ve depolama stabilite özelliklerini değerlendirmeyi amaçlamışlardır. Elde ettikleri test sonuçlarında nanokil ilavesinin modifiye asfaltın yumuşama noktası ve viskozitesini artırdığını göstermişlerdir. Nanokil modifiye asfaltta WAA'nın varlığının, diğer özellikleri üzerinde olumsuz bir etki yaratmadan şartname sınırlarını sağladığını, nanokil modifiye asfaltta WAA'nın varlığının asfaltın sıcaklık duyarlılığını arttırdığını saptamışlardır [41].

Fini ve arkadaşları, bağlayıcının reolojik özellikleri ve oksidatif yaşlanma direncini arttırmak için bir asfalt bağlayıcı katkısı olarak nano-silika kullandıkları çalışmalarında bitüm modifikasyonunda nanopartiküllerin uygulanmasının yararlarını araştırmışlardır. Saf asfalt bağlayıcıya nanosilikanın farklı yüzdelere ekleyerek bağlayıcıyı kısa süreli yaşlanmaya maruz bırakmışlardır. Nanosilika ilaveli bağlayıcı, taramalı elektron mikroskobu (SEM), Superpave testleri ve FTIR testine tabi tutularak nano-silikanın asfalt bağlayıcının kimyasal, reolojik ve morfolojik özellikleri üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Nanosilikanın asfalt bağlayıcıda kullanımının, bağlayıcının reolojik özelliklerini ve oksidatif yaşlanma direncini artırdığını belirtmişlerdir [42].

Taherkhani ve arkadaşları, nanosilikanın farklı yüzdeleriyle modifiye ettikleri asfalt bağlayıcının bazı mühendislik özelliklerini araştırmayı amaçladıkları çalışmalarında, 60/70 penetrasyon sınıfı asfalt çimentosuna ağırlıkça %1, 3 ve 5 oranlarında nanosilika ilave ederek modifiye karışımlar elde etmiş ve özelliklerini

değerlendirmişlerdir. Artan nanosilika içeriği ile modifiye bağlayıcının penetrasyon değerinin artış gösterdiğini ve bu artışla asfaltın sertliğinin nanosilika modifikasyonu ile arttığını göstermişlerdir. Nanosilika içeriği arttıkça, bitümün yumuşama noktası ve penetrasyon indeksinin de arttığını tespit etmişlerdir. Bu bilgiye dayanarak artan nanosilika içeriğiyle bitümde sıcaklık hassasiyetinin azaldığını göstermişlerdir. Bitümün sıcaklık hassasiyetinin azalmasının, kalıcı deformasyona ve asfalt bağlayıcının düşük sıcaklıkta çatlamasına karşı direncinin artmasına neden olduğunu tayin etmişlerdir [43].

Yao ve ekibi, çalışmalarında nanosilika ile modifiye edilmiş asfalt bağlayıcıların reolojik özelliklerini ve kimyasal bağlarını değerlendirmiştir. Asfalt bağlayıcıların ağırlığına göre %4 ve %6 oranında saf asfalta nanosilika ilave ederek modifiye asfaltlar elde etmişlerdir. Saf asfalt bağlayıcıya nanosilikanın eklenmesi ile nano modifiye asfalt bağlayıcıların viskozite değerlerinin azaldığını ve bu azalmayla bağlayıcının daha düşük bir sıkıştırma sıcaklığına veya yapım işleminin daha düşük enerji tüketimine ihtiyaç duyulacağını göstermişlerdir. Ayrıca saf asfalta nanosilika eklenmesinin, asfalt bağlayıcıların elastik geri dönüş yeteneğini geliştirdiğini saptamışlardır. Nanosilika modifiyeli asfalt karışımların dinamik modülünün, saf asfalt karışımlara göre önemli ölçüde arttığını, %6 nanosilika modifiye asfalt karışımının yüksek sıcaklıklarda %4 nanosilika modifiye asfalt karışımından daha yüksek dinamik modüle sahip olduğunu tespit etmişlerdir [44].

Jahromi ve Khodaii, iki tür nanokil kullanarak (nanokil I-15 ve cloisite-15A) yaptıkları çalışmada bitümdeki nanokil trombositlerin nanoyapı pullaşmasını X-ışını kırınımı (XRD) kullanılarak incelemişlerdir. Buldukları test sonuçlarına göre, nanokilin bitümün sertliğini artırırken, aynı zamanda faz açısını düşürdüğünü ve yaşlanma direncini arttırdığını göstermişlerdir [45].

Yusoff ve diğerleri, polimer modifiye asfalt (PMA) karışımına nano-silis parçacıklarının eklenmesi ile yaptıkları çalışmada, elde ettikleri modifiye asfaltların performans özelliklerini araştırmışlardır. Polimer modifiye asfalta %0; %2 ve %4 asfalt bağlayıcı konsantrasyonlarında nanosilis ile karıştırmışlardır. Çalışmada yapılan laboratuvar çalışmalarında, %4 nanosilikanın ilave edilmesinin, çeşitli durumlarda PMA'nın performans özelliklerini iyileştirmek için optimum içerik olduğu sonucuna varmışlardır. SEM görüntüleri, asfalt bağlayıcı içerisinde nanosilis parçacıklarının iyi dağıldığını göstermiştir. Bu modifiye bağlayıcılar kullanarak hazırlanan karışımların nem duyarlılığının geliştiği, bu gelişmeyle asfalt

karışımlarının mukavemetinin nanosilis parçacıklarının ilavesiyle arttığını göstermişlerdir. Ayrıca, orta ve yüksek sıcaklıklarda sırasıyla nanosilika modifikasyonu ile yorulma ömründe önemli artışlar ve çatlak deformasyonu gözlemlenmiştir [46].

Saltan ve ekibi, çalışmalarında Superpave tasarım yöntemine göre bitümün nano malzemelerle modifiye edilmesi ile Sıcak Karışım Asfalt (HMA) ve bitümün performansını değerlendirmişlerdir. Çalışmada bitüm nanosilika parçacıkları (SiO_2NP) ile modifiye edilmiştir. Nanosilika, saf bitüme ile ağırlıkça %0,1; %0,3 ve %0,5 oranında karıştırılmıştır. Modifiye HMA'nın nem duyarlılığı Modifiye Lottman test prosedürüne göre değerlendirmiş ve modifiye bitümlerin modifikasyonun tek tip olup olmadığını taramalı elektron mikroskopisi (SEM) ile görüntülemişlerdir. Sonuç olarak, %0,3 nanosilika modifiyeli karışımlarda tatmin edici sonuçlar elde etmişlerdir. Bu içerikte modifiye edilmiş HMA numunesi, saf numuneye kıyasla neme karşı %26,25 daha dayanımlı olduğunu saptamışlardır. SEM sonuçlarına göre nano malzemelerin modifiye bitüm içerisinde homojen bir dağılım gösterdiğini tespit etmişlerdir [47].

Khadrah ve arkadaşları, yaptıkları çalışmada asfalta asfaltın ağırlıkça %2, %4 ve %6 oranlarında nanosilika ilave ederek modifiye asfalt bağlayıcılar ve karışımlar oluşturmuş; modifiye bağlayıcıların özelliklerini viskozite, penetrasyon, yumuşama noktası, parlama noktası ve Marshall stabilite deneylerini kullanarak karakterize etmişlerdir. Modifiye bağlayıcılarda nanosilika yüzdesinin artmasıyla penetrasyonda, viskozitede ve yumuşama noktasında artış olduğunu ancak parlama noktasının etkilenmediğini gözlemlenmiştir. Marshall stabilite deney sonuçlarında %2 oranında nanosilika ilave edildiğinde stabilite artmış; ancak %4 nanosilika ilavesinde stabilite değerinin %2 oranındaki değerden daha küçük olduğu ve saf numune değerine ulaşamadığını, nanosilika modifiyeli karışımlarda %6 katkı oranında ise stabilitenin tekrar yükseldiğini tespit etmişlerdir [48].

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada, katkı maddesi olarak nanosilika kullanılarak, nanosilikanın bitüm ve bitümlü sıcak karışımlarda modifiyer olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. Bu amaçla öncelikle saf bağlayıcı ile agreganın özellikleri tespit edilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar incelenerek, saf bağlayıcıya bağlayıcının ağırlıkça %1, 3, 5 ve 7 oranlarında nanosilika katkı malzemesi eklenerek modifiye bitümler elde edilmiştir. İlk olarak saf ve modifiye bağlayıcılar kısa ve uzun süreli yaşlandırma işlemine tabi tutulmuştur. Ardından hazırlanmış olan saf ve modifiye bitümlü bağlayıcılar geleneksel ve Superpave test yöntemlerine tabi tutularak fiziksel ve reolojik özellikleri tespit edilmiştir. Daha sonra, belirlenen agrega gradasyonu ve saf bağlayıcı kullanılarak Marshall dizayn yöntemine göre optimum bitüm içeriği tespit edilmiştir. Bu optimum bitüm içeriğine göre farklı oranlarda hazırlanmış olan nanosilika ilaveli bitümlü bağlayıcılar kullanılarak yine Marshall dizayn yöntemine uygun şekilde modifiye karışım numuneleri hazırlanmış ve numuneler performans deneylerine tabi tutulmuştur.

4.1. Bitümlü Bağlayıcı Seçilmesi

Tez çalışmasında bağlayıcı olarak Karayolları 8. Bölge Müdürlüğü'nden temin edilen B 160/220 penetrasyon sınıfına sahip bitümlü bağlayıcı kullanılmıştır. Kullanılan bitümlü bağlayıcının bazı fiziksel özellikler geleneksel deneylerle tespit edilerek sonuçları Çizelge 4.1'de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Saf Bağlayıcının (B160/220) Fiziksel Özellikleri

Deneyler	Deney Standardı	B 160/220	
		Şartname Limitleri	Ölçülen Değer
Penetrasyon (mm)	EN 1426	160-220	163
Yumuşama Noktası (°C)	EN 1427	35-43	41,6
Düktülite (cm)	TS 119	min 100	125
Parlama Noktası (°C)	EN 22719	min 220	244
Özgül Ağırlık (gr/cm ³)	TS 1087	1,0 – 1,1	1,038

4.2. Agrega Seçilmesi

Çalışmada, agrega malzemesi olarak Malatya Belediyesi'nden temin edilen kalker kökenli kırmataş agrega kullanılmıştır. Karışımlarda kullanılan agreganın gradasyonu Çizelge 4.2'de, agreganın fiziksel özellikleri ise Çizelge 4.3'de verilmiştir.

Çizelge 4.2. Agrega Gradasyonu

Elek Boyutu (mm-no)	19,0	12,5	9,5	4,75	2,36	1,18	0,600	0,300	0,150	0,07
	3/4'	1/2'	3/8'	#4	#8	#16	#30	#50	#100	#200
%Geçen	100	94	84	58	35	22	16	12	8	5

Çizelge 4.3. Agreganın fiziksel özellikleri

Deney Adı	Deney Standardı	Şartname Limiti	Hesaplanan Değer
Kaba agrega zahiri özgül ağırlık (gr/cm ³)	ASTM C 127	-	2,70
Kaba agrega hacim özgül ağırlık (gr/cm ³)		-	2,67
Kaba agrega su emme yüzdesi		Maks. 2	0,47
İnce agrega zahiri özgül ağırlık (gr/cm ³)	ASTM C 128	-	2,75
İnce agrega hacim özgül ağırlık (gr/cm ³)		-	2,63
İnce agrega su emme yüzdesi		Maks. 2	1,66
Filler zahiri özgül ağırlık (gr/cm ³)	ASTM D 854	-	2,85
Aşınma Kaybı (Los Angeles) (%)	ASTM D131	Maks. 30	27
Donma Kaybı (MgSO ₄) (%)	ASTM C88	Maks. 10	5
Yassı ve uzun parçalar (%)	ASTM D4791	Maks. 10	5

4.3. Katkı Malzemesi Seçilmesi

Çalışmada katkı malzemesi olarak bitüm modifikasyonunda kullanılmak üzere “Elkem Silikon Materyaller” firmasından temin edilen nanosilika kullanılmıştır. Modifiye karışımda bitüme ilave edilerek kullanılan nanosilikanın genel özellikleri Çizelge 4.4’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.4. Nanosilikanın Genel Özellikleri

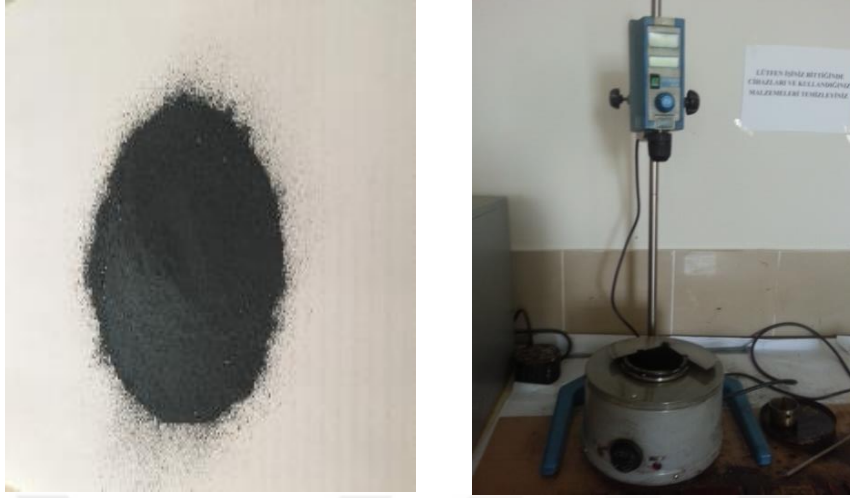
Özellik		Nanosilika			
Form		Ultra ince amorf toz (solunabilir toz)			
Koku		Kokusuz			
Erime Noktası (°C)		1550-1570			
Çözünürlük (Su)		Çözünmez/Hafifçe Çözünür			
Çözünürlük (Organik Çözücüler)		Çözünmez/Az Çözünür			
Spesifik Yerçekimi (Su=1)		2,2-2,3			
Kimyasal Bileşimi					
Kompozisyon	Fe, ppm	Na, ppm	Ca, ppm	Ti, ppm	SiO2, %
Değer	<20	<50	<70	<120	>99
Fiziksel Özellikleri					
Saflık (%)	Parçacık Boyutu (mm)	SSA (m2/g)	Renk	Kütle Yoğunluğu (kg/m3)	Gerçek Yoğunluk (g/cm3)
+99	11-13	200	Gri	150-700	2,4

4.4. Modifiye Bitümlerin Hazırlanması

Çalışmada nanosilikanın bitüm ve bitümlü karışımların özelliklerine etkisi araştırılmak üzere saf bitüme bitüm ağırlığının %1, %3, %5 ve %7 oranlarında nanosilika ilave edilerek modifiye bitümler hazırlanmıştır. Saf bitüme belirlenen oranlarda nanosilika ilave edilerek modifiye bitüm hazırlanma prosedürü aşağıdaki adımlar izlenerek yapılmıştır:

Saf bitüm (B 160/220), yaklaşık 45-60 dk kadar akışkan hale gelene kadar etüvde 160°C'de ısıtılmıştır. Isıtılan ve akışkan hale gelen saf bitümden 500 gr. alınarak, yine ısıtılmış olan karıştırma kabına boşaltılmıştır. Önceden belirlenen oranlarda nanosilika hesap edilerek tartılıp, etüvde ısıtılarak karışıma katılmak üzere hazırlanmıştır. Şekil 4.1(a)'da karışımlarda kullanılan nanosilika gösterilmiştir. Ayarlaması yapılmış olan karıştırıcının haznesine karıştırma kabı yerleştirilmiş ve ısıtılarak hazırlanan nanosilika saf bitüme dikkatlice ve yavaş yavaş ilave edilerek karıştırma işlemi Şekil 4.1(b)'de görülen karıştırma cihazı ile yapılmıştır. Karıştırma işlemi 1200 devir/dakika dönme hızıyla gerçekleşmektedir. Bu işlem 60 dakika sürmüştür. Karışım homojen dağılım gösterdiğinde, karışım deneyi başarılı kabul edilmiş ve bağlayıcı temiz bir kaba aktarılacak deneyler için hazır hale getirilmiştir. Bu işlem bütün yüzdelere için aynı şekilde gerçekleştirilmiştir.

Çalışmada saf ve modifiye bitümler sırasıyla; B, B+%1N, B+%3N, B+%5N ve B+%7N olarak adlandırılmıştır.



Şekil 4.1. Karışımlarda Kullanılan Nanosilika(a) ve Karıştırma Cihazı (b)

4.5. Bağlayıcılar Üzerinde Uygulanan Deneyler ve Sonuçlar

Hazırlanan saf ve nanosilika modifiyeli bağlayıcılar üzerinde ilk olarak fiziksel deneyler yapılmıştır. Daha sonra kısa süreli (RTFOT) yaşlandırma ve uzun süreli (PAV) yaşlandırma deneyleri yapılmıştır. Ayrıca yaşlandırılmamış, RTFOT ve PAV kalıntısı bağlayıcılar Superpave testlerine de tabii tutulmuştur Tüm deney sonuçları sırasıyla alt başlıklar halinde aşağıda verilmiştir.

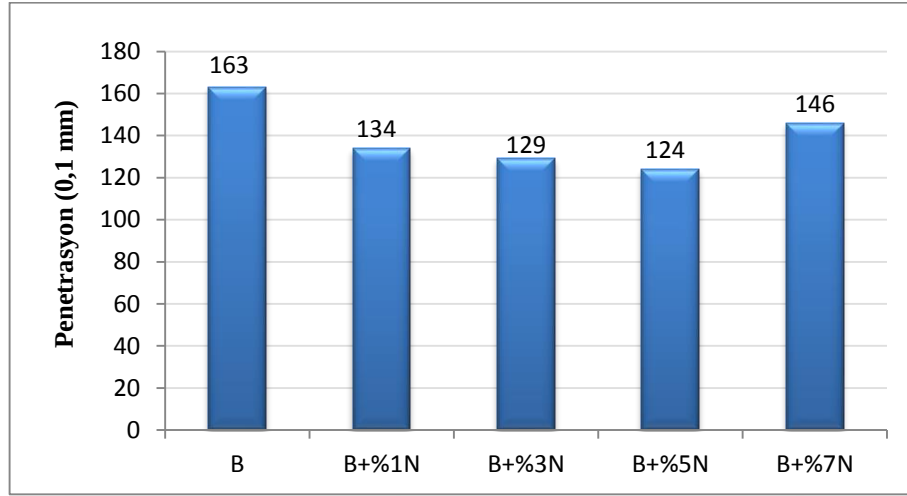
4.5.1. Bağlayıcıların Fiziksel Özelliklerinin Belirlenmesi

Saf ve nanosilika modifiyeli bağlayıcıların fiziksel özelliklerin belirlenmesi için yapılan penetrasyon, yumuşama noktası ve düktülite deney sonuçları Çizelge 4.5’de verilmiştir.

Çizelge 4.5. Saf ve Nanosilika İlaveli Bağlayıcıların Fiziksel Özellikleri

Bağlayıcı Türü	Penetrasyon (mm)	Yumuşama Noktası (°C)	Düktülite (cm)
B	163	41,6	125
B+%1N	134	42,8	117
B+%3N	129	44,8	113
B+%5N	124	45,1	109
B+%7N	146	42,6	115

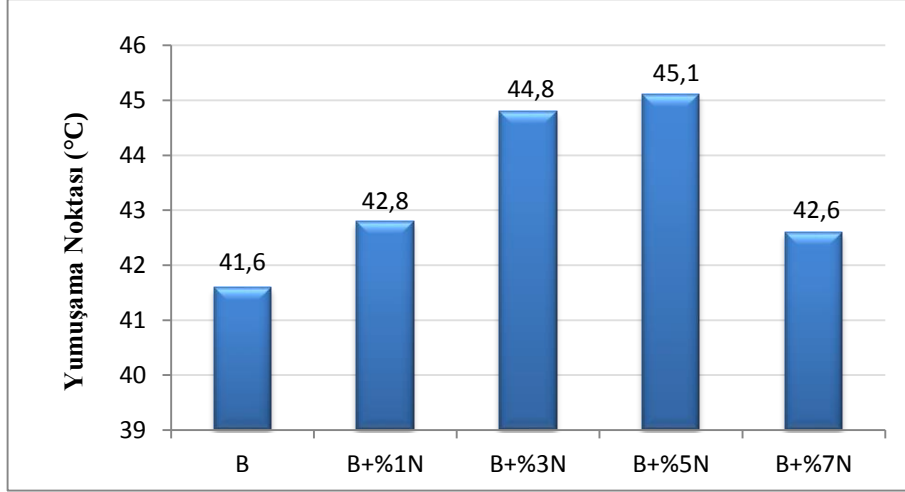
Bağlayıcıların kıvam veya sertliğinin bir ölçüsü olan penetrasyon değerlerinin nanosilika ile değişim grafiği Şekil 4.2’de gösterilmiştir.



Şekil 4.2. Bağlayıcıların Penetrasyon Değişimleri

Çizelge 4.5 ve Şekil 4.2’ de görüldüğü gibi saf bitüme nanosilika katkı ilavesi ile %5 nanosilika oranına kadar bağlayıcıların penetrasyon değerlerinde başlangıçta bir azalma meydana gelmiştir. Fakat katkı oranının artmaya devam etmesi sonucunda daha sonra bir artış meydana gelmiştir. Bu değişimler saf bağlayıcıya göre sırasıyla %17,76; %20,85 ve %23,92 azalma ve tekrar katkı oranının artmasıyla %10,42 artış şeklinde meydana gelmiştir. Bu durumda, nanosilika ilavesiyle modifiye bitümde önce sertleşme görüldüğü ama daha sonra katkı oranının artmasıyla tekrar yumuşamaya başladığını ifade etmek mümkündür. Bu sertleşme veya penetrasyon değerindeki azalma sonucunda nanosilika katkılı modifiye bitümlerin penetrasyon sınıfı B 100/150 olarak değişmiştir. Ancak sertlikteki bu artış en fazla %5 nanosilika modifiyeli karışımlarda meydana gelmiştir. Bunun sonucu olarak, nispeten daha ılıman bölgelerde kullanılabilen B160/220 penetrasyon dereceli bağlayıcının nanosilika ilave edilmesiyle daha sıcak bölgelerde de kullanılabileceğini ve bitümden kaynaklı kalıcı deformasyonlara karşı daha elverişli olabileceğini ifade etmek mümkündür.

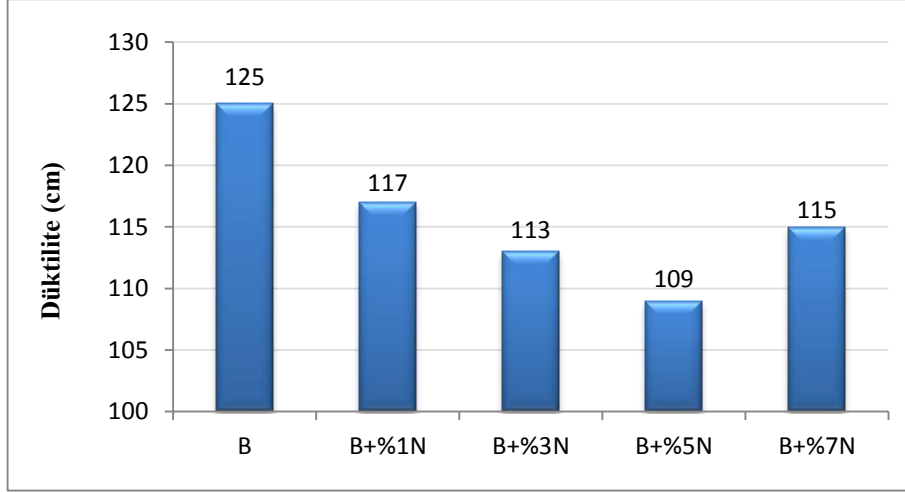
Bağlayıcıların yumuşama noktası değerlerindeki değişim Şekil 4.3’de verilmiştir.



Şekil 4.3. Bağlayıcıların Yumuşama Noktası Değişimleri

Şekil 4.3’de görüldüğü üzere B 160/220 saf bitümüne nanosilika ilavesiyle elde edilen modifiye bağlayıcıların yumuşama noktası değerlerinde önemli değişimler meydana gelmiştir. Nanosilika modifiyeli bitümlü karışımlarda katkı oranı arttıkça yumuşama noktası değeri %5’e kadar artış gösterip, daha sonra azalma eğilimi göstermiştir. Bu değişimler saf bağlayıcıya göre %2,88; %7,69 ve %8,41 artış ve daha sonra %2,40 azalma şeklinde meydana gelmiştir. Bu karışımlarda en yüksek yumuşama noktası değeri %5 nanosilika oranında iken elde edilmiştir. Ayrıca yumuşama noktası deney sonuçlarının penetrasyon sonuçları ile uyumluluk gösterdiğini de söylemek mümkündür. Kısacası bağlayıcılar ilk olarak sertleşmiş, daha sonra tekrar yumuşama eğilimi göstermiştir. Düşük penetrasyon ve yüksek yumuşama noktası değerleri, %5 nanosilika ilavesiyle bağlayıcının sıcaklık hassasiyetini azaldığını ve daha sıcak bölgelerde kullanılabileceğini söylemek mümkündür.

Bağlayıcıların nanosilika içeriğine bağlı olarak düktilite değerlerinde meydana gelen değişim Şekil 4.4’te gösterilmiştir.



Şekil 4.4. Bağlayıcıların Düktilite Değişimleri

Şekil 4.4'te görüldüğü gibi B 160/220 saf bitüme nanosilika ilave edilmesiyle düktilite değerlerinde önemli değişimler meydana gelmiştir. Nanosilika ilavesiyle modifiye bitümlerin düktilite değerlerinde ilk olarak %5'e kadar bir azalış, daha sonra ise artış meydana gelmiştir. Bu değişimler sırasıyla %6,4; %9,6 ve 12,8 azalma ve katkı miktarının artışıyla %8 artış şeklinde meydana gelmiştir. Düktilite değerindeki azalma, bitümlü bağlayıcının uzama kabiliyetinin ve kohezyon mukavemetinin düşmesini ifade ederken, düktilite değerinin artması ise yine kohezyon ve uzama kabiliyetindeki artış olarak ifade edilebilir.

Saf ve nanosilika modifiyeli bağlayıcıların sıcaklığa karşı hassasiyetinin bir ölçüsü olan penetrasyon indeksi (PI) değerleri bağlayıcıların penetrasyon ve yumuşama noktası değerlerinden faydalanılarak formül 4.1 ve 4.2 yardımıyla hesaplanmıştır.

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

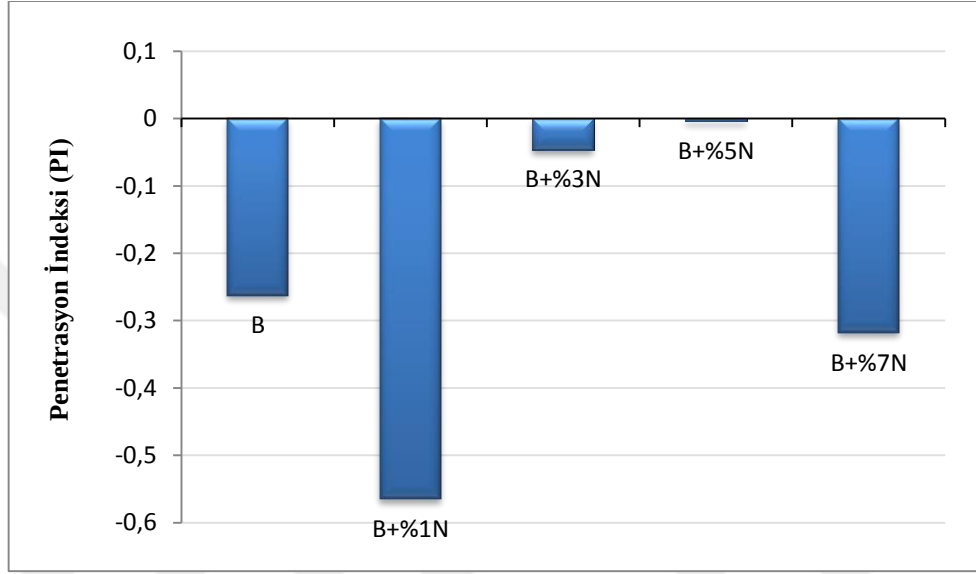
$$PI = \frac{20 - 500A}{1 + 50A} \quad (4.2)$$

Formüldeki 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 göstermektedir [49].

Nanosilika içeriğine bağlı olarak bağlayıcıların PI değerleri Çizelge 4.6'da ve PI değerlerindeki değişim Şekil 4.5'de verilmiştir.

Çizelge 4.6. Penetrasyon İndeksi (PI) Sonuçları

Bağlayıcı Türü	Penetrasyon İndeksi (PI)
B	-0,263
B+%1N	-0,5652
B+%3N	-0,0468
B+%5N	-0,0042
B+%7N	-0,3185



Şekil 4.5. Bağlayıcıların PI Değişimleri

Çizelge 4.6 ve Şekil 4.5'te görüldüğü gibi B160/220 saf bitüme nanosilika ilavesi ile PI değerlerinde önemli değişimler meydana gelmiştir. Saf ve modifiye bağlayıcıların PI değerleri sırasıyla -0,263; -0,5652; -0,0468; -0,0042 ve -0,3185 olarak elde edilmiştir. Nanosilika ilavesiyle bağlayıcıların sıcaklık hassasiyetlerinin önce düştüğü sonra tekrar yükselme eğiliminde olduğu görülmektedir. Sıcaklık hassasiyeti bakımından en ideal katkı oranının %5 nanosilika katkılı modifiye karışımlar olduğu görülmektedir.

4.5.2. Saf ve Nanosilika Modifiyeli Bağlayıcıların Yaşlandırılması

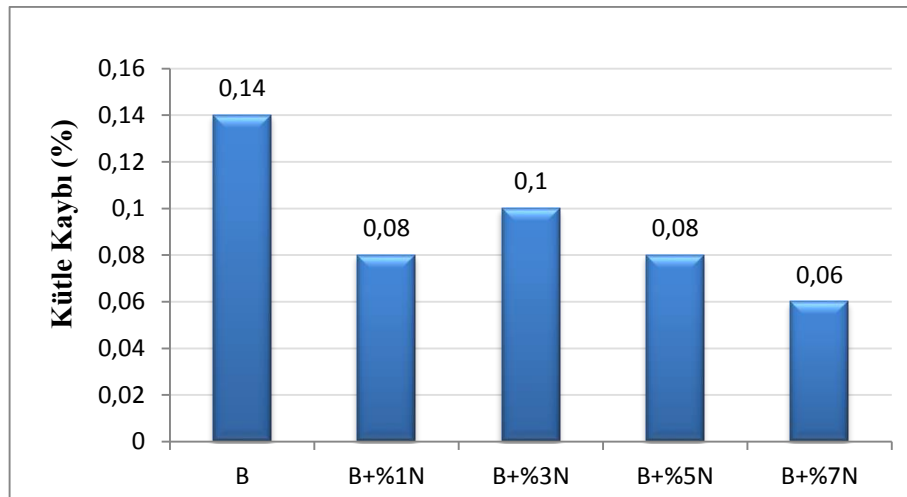
Hazırlanan saf ve nanosilika katkılı bağlayıcılar dönel ince film etüvü deneyi (RTFOT) ile kısa süreli yaşlandırma deneyine tabii tutulmuştur. Saf ve nanosilika katkılı bağlayıcılar, 150°C sıcaklıkta ısıtılarak 8 adet deney şişesinin her birinin içerisine yaklaşık 35±0,5 gr. doldurulup 163°C sıcaklığa ulaşmış olan RTFOT cihazının içindeki dönel tabla bölmelerine yerleştirilmiştir. Tabla her dakikada 15

devir yapacak şekilde 75 dakika süreyle deney gerçekleştirilmiştir. 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 nanosilika modifiyeli bağlayıcıların kütle kayıpları Çizelge 4.7’de, kütle kayıplarındaki değişim ise Şekil 4.6’da verilmiştir.

Çizelge 4.7. Bağlayıcıların Kütle Kayıpları

Bağlayıcı Türü	Şartname Sınırları	M1	M2	Kütle Kaybı	Ortalama Kütle Kaybı
B	Max 1,0	194,36	194,10	0,13	0,14
		194,42	194,28	0,16	
B+%1N		194,45	194,24	0,10	0,08
		188,42	188,37	0,07	
B+%3N		190,12	189,91	0,10	0,10
		194,52	194,32	0,10	
B+%5N		192,23	192,02	0,10	0,08
		191,84	191,70	0,07	
B+%7N		192,06	191,91	0,07	0,06
		191,46	191,33	0,06	



Şekil 4.6. Bağlayıcıların Kütle Kayıplarındaki Değişim

Çizelge 4.7 ve Şekil 4.6’da görüldüğü gibi B 160/220 saf bitüme nanosilika ilave edilmesiyle kütle kaybında azalma şeklinde değişimler meydana gelmiştir. Ancak oluşan kütle kayıpları şartname limiti olan max %1,0 değerinden oldukça

düşük elde edilmiştir. Dolayısıyla nanosilika ilavesiyle bağlayıcıların sıcaklık ve oksidasyon direncine olumsuz bir etkisi olmamıştır, hatta olumlu bir etkiye sahip olduğu ifade edilebilir.

4.6. Bağlayıcıların Performans Deneyleri

Çalışmada ilk olarak B160/220 penetrasyon sınıfı bağlayıcının yüksek, orta ve düşük sıcaklıklarda göstereceği performans özellikleri tespit edilmiştir. Daha sonra nanosilika katkılı orijinal, kısa dönem (RTFOT) ve uzun dönem (PAV) yaşlandırılmış numunelerinin performans özellikleri tespit edilmiştir.

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

Bu deney ile bağlayıcıların kaplama yapımından hemen sonra yüksek servis sıcaklıklarında kaplamanın tekerlek izi oluşumuna ve ilerleyen servis ömründe orta servis sıcaklıklarında yorulma çatlağı oluşumuna karşı göstereceği direnç belirlenmektedir.

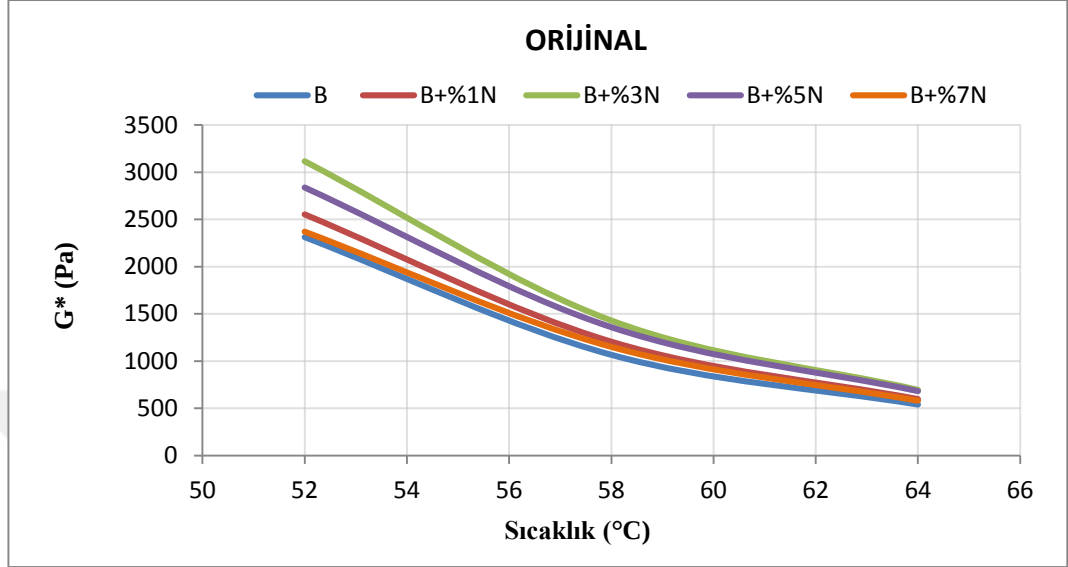
Deney orijinal, kısa dönem yaşlandırılmış (RTFOT) ve uzun dönem yaşlandırılmış (PAV) bağlayıcılara uygulanmıştır. Deney orijinal bağlayıcılar üzerinde 52°C, 58°C, 64°C sıcaklıklarda, RTFOT kalıntısı bağlayıcılar üzerinde 52°C, 58°C, 64°C, 70°C sıcaklıklarda, PAV kalıntısı bağlayıcılar üzerinde ise 16°C, 19°C, 22°C ve 25°C sıcaklıklarda yapılmıştır.

Orijinal (yaşlandırılmamış) saf ve nanosilika katkılı bağlayıcılar üzerine uygulanan DSR sonuçları Çizelge 4.8’ de verilmiştir.

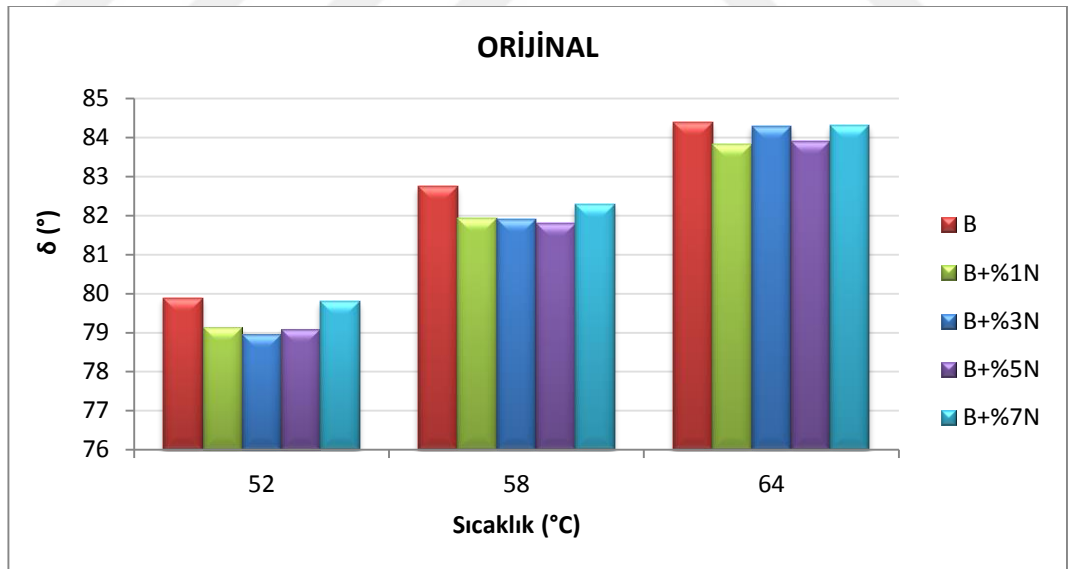
Çizelge 4.8. Orijinal Bağlayıcıların DSR Sonuçları

Numune Türü	Sıcaklık (°C)	B	B+%1N	B+%3N	B+%5N	B+%7N
		G*				
O R İ J İ N A L	52	2311	2555	3117	2839	2370
	58	1065	1205	1430	1358	1150
	64	538,7	596	695,75	680,47	579,98
	δ (°)					
	52	79,89	79,12	78,95	79,1	79,81
	58	82,74	81,93	81,91	81,81	82,28
	64	84,39	83,82	84,3	83,92	84,31
	G*/ sin δ					
	52	2347,45	2601,77	3176	2891	2408
	58	1073,61	1217,05	1445	1372	1161
	64	541,29	599,48	699,22	684,31	582,85

Orijinal bağlayıcılara ait kayma modülü (G^*) nün sıcaklıkla değişimi Şekil 4.7’de, orijinal bağlayıcıların faz açılarının (δ) sıcaklıkla değişimi ise Şekil 4.8’de gösterilmiştir.



Şekil 4.7. Orijinal Bağlayıcıların Kayma Modülü (G^*) Değerlerinin Sıcaklıkla Değişimi



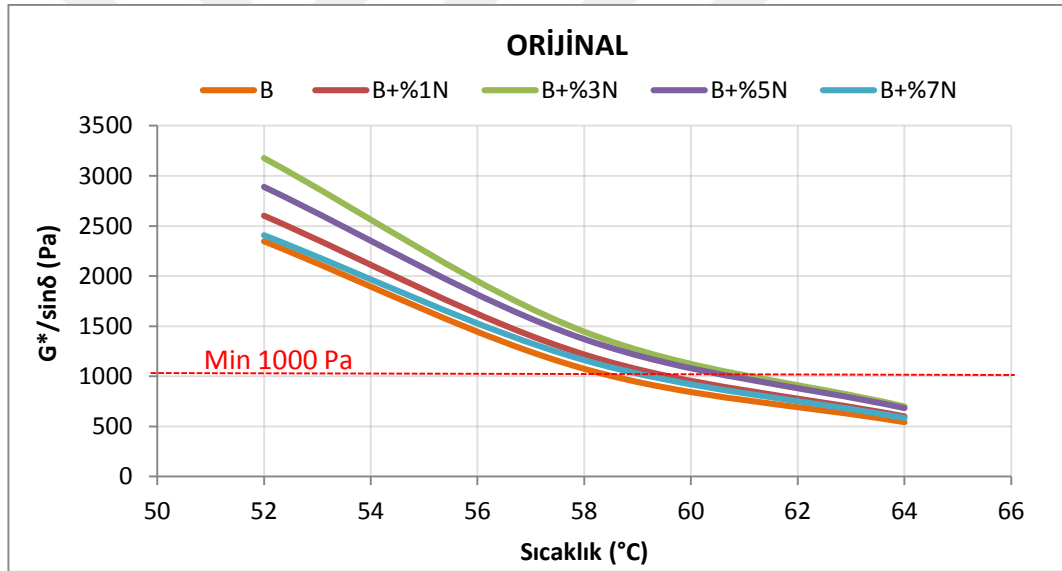
Şekil 4.8. Orijinal Bağlayıcıların Faz Açılarının (δ) Sıcaklıkla Değişimi

Şekil 4.7 incelendiğinde, sıcaklığın artmasıyla G^* (kayma modülü) değerlerinin doğal olarak azaldığı görülmektedir. G^* (kayma modülü), tekerrür eden kayma gerilmelerinin yarattığı deformasyonlara karşı bağlayıcının gösterdiği toplam dirençtir. G^* (kayma modülü) değerinin azalması, bağlayıcının deformasyonlara

karşı direncin azaldığının göstergesidir. Ancak bütün sıcaklıklarda genel olarak saf bağlayıcıya göre nanosilika katkılı bağlayıcıların G^* (kayma modülü) değerlerinde azda olsa bir artış olduğu, yani nanosilika ilavesiyle bağlayıcıların deformasyonlara karşı nispeten daha dirençli olduğunu ifade etmek mümkündür.

Şekil 4.8 incelendiğinde, sıcaklığın artmasıyla bağlayıcıların faz açıları doğal olarak artmaya başlamıştır. Faz açısının artması malzemenin viskoz davranmaya başladığını göstermektedir. Bağlayıcının viskoz davranışı, kalıcı deformasyonlara karşı direncinin azaldığını ve daha fazla kalıcı deformasyon yapacağını ifade etmektedir. Ancak saf bağlayıcı ile kıyaslandığında nanosilika katkılı bağlayıcıların faz açıları bütün sıcaklıklarda düşüş eğilimi göstermiştir. Bu sebeple modifiye bağlayıcıların nispeten daha elastik bir davranış sergiledikleri ifade edilebilir.

Superpave şartnamesine göre bağlayıcıların, tekerlek izi parametresi olan $G^*/\sin\delta$ değeri değerlerinin sıcaklıkla değişimi Şekil 4.9’ da verilmiştir.



Şekil 4.9. Orijinal Bağlayıcıların $G^*/\sin\delta$ Değerlerinin Sıcaklıkla Değişimi

Şekil 4.9’da görüldüğü gibi bağlayıcıların tekerlek parametresi olan $G^*/\sin\delta$ değerlerinde sıcaklığın artışıyla bağlı olarak bir azalma meydana gelmiştir. Ancak genel olarak, her bir sıcaklık için nanosilika miktarının artmasıyla saf bağlayıcıya göre modifiye bağlayıcıların tekerlek izi parametresi değerlerinde artışlar meydana gelmiştir. Buna rağmen orijinal (yaşlandırılmamış) bütün bağlayıcıların tekerlek izi parametresi ($G^*/\sin\delta$) değerleri şartnamenin öngördüğü min 1000 Pa sınırını 58°C’de sağlamıştır. Buna göre orijinal saf ve modifiye bağlayıcıların yüksek sıcaklık

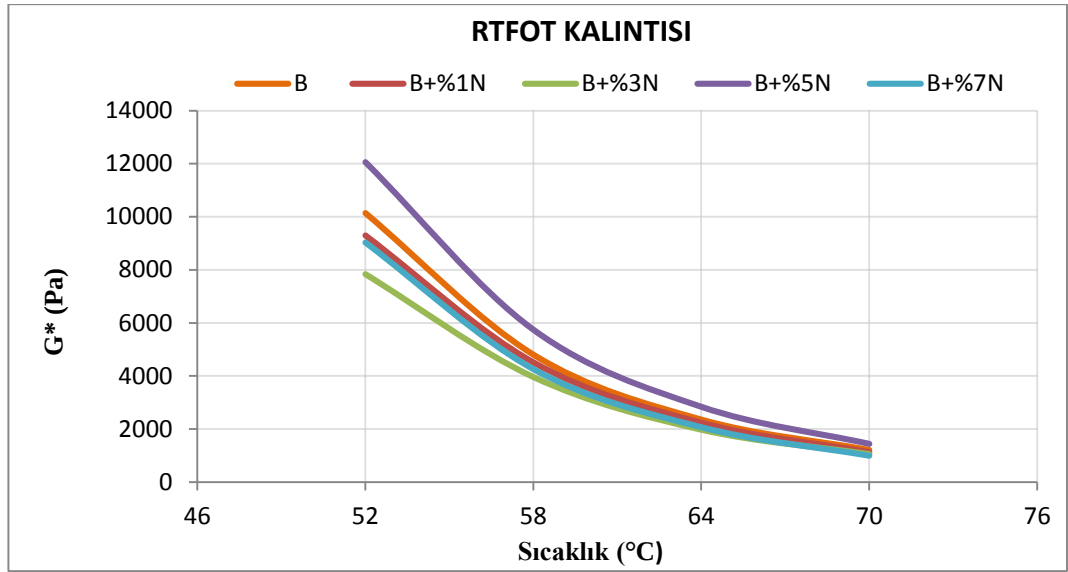
performans sınıfları PG 58-Y olarak tespit edilmiştir. Bu sonuç, nanosilika katkısının tekerlek izi parametresi üzerinde önemli bir etkiye sahip olmadığını göstermektedir.

RTFOT kalıntısı saf ve nanosilika modifiyeli bağlayıcılar üzerinde 52°C, 58°C, 64°C, 70°C sıcaklıklarda yapılmış olan DSR deney sonuçları Çizelge 4.9'da verilmiştir.

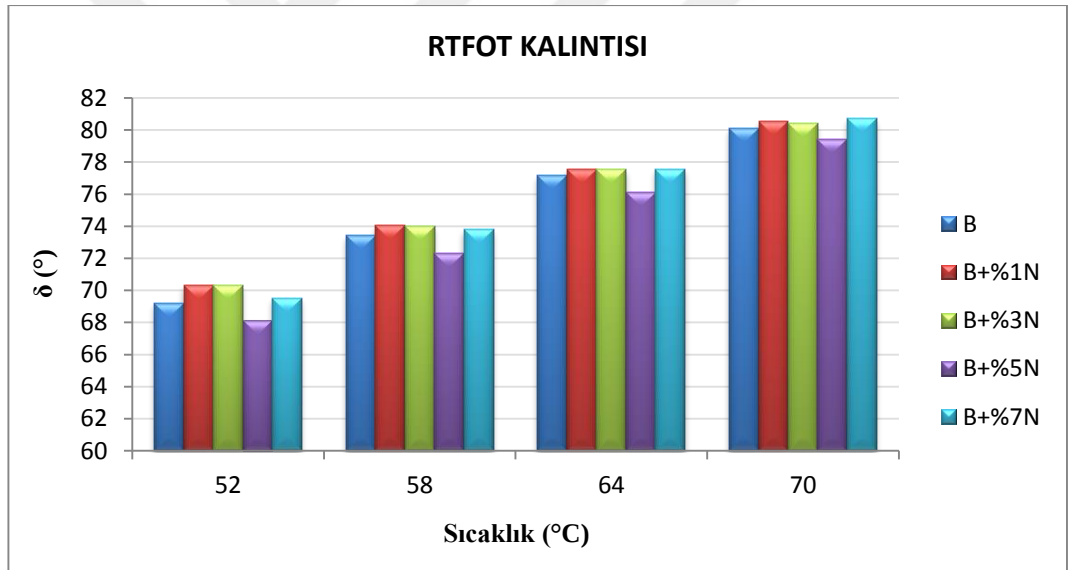
Çizelge 4.9. RTFOT Kalıntısı Bağlayıcıların DSR Sonuçları

Numune Türü	Sıcaklık	B	B+%1N	B+%3N	B+%5N	B+%7N
		G*				
R T F O T	52	10142	9299	7840	12058	9026
	58	4802	4512	3959	5742	4253
	64	2353	2235	1972	2835	2065
	70	1208	1124	1049	1437	991
	δ (°)					
	52	69,22	70,31	70,31	68,12	69,54
	58	73,4	74,04	74,01	72,31	73,8
	64	77,15	77,56	77,53	76,12	77,58
	70	80,11	80,55	80,43	79,4	80,72
	G*/sin δ					
	52	10848	9876	8326	12994	9634
	58	5011	4693	4119	6027	4429
	64	2413	2289	2020	2920	2115
	70	1227	1139	1064	1462	1004

RTFOT kalıntısı bağlayıcıların kayma modülü (G*) ve faz açısı (δ) değerlerinin sıcaklık ile değişim grafikleri sırasıyla Şekil 4.10 ve 4.11'de gösterilmiştir.



Şekil 4.10. RTFOT Sonrası Bağlayıcıların Kayma Modülü (G^*) Değerinin Sıcaklıkla Değişimi

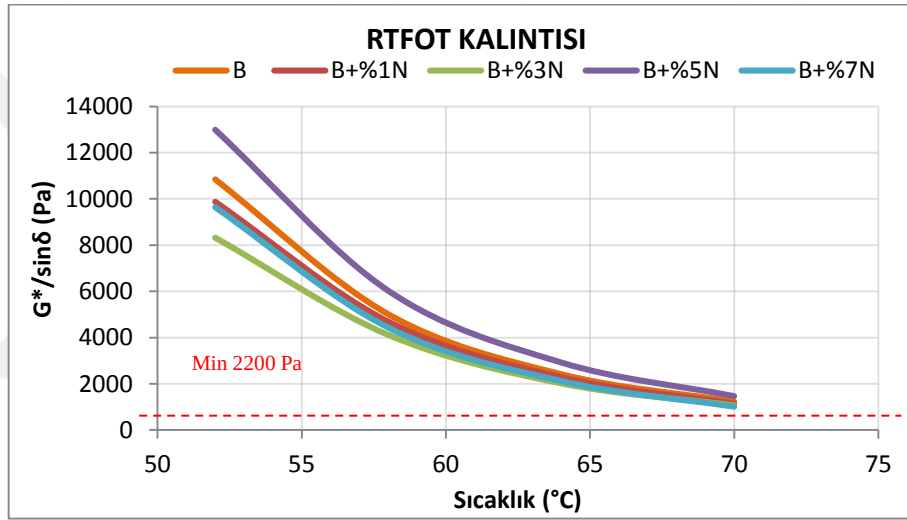


Şekil 4.11. RTFOT Sonrası Bağlayıcıların Faz Açılarının (δ) Sıcaklıkla Değişimi

Şekil 4.10'da görüldüğü gibi RTFOT kalıntısı bağlayıcılar üzerinde yapılan DSR deneyi sonucunda, kayma modülü parametresinin sıcaklık arttıkça azaldığı görülmektedir. Kayma modülü parametresi değerlerinin azalması, bağlayıcının kalıcı deformasyona karşı gösterdiği direncin azaldığı anlamına gelmektedir. Bağlayıcı içerisindeki nanosilika miktarının artışına bağlı olarak bütün sıcaklıklarda G^* (kayma modülü) değerlerinde genel bir azalma meydana geldiği, dolayısıyla modifiye bağlayıcıların kalıcı deformasyonlara karşı gösterdikleri dirençte bir azalma meydana geldiği görülmektedir.

Şekil 4.11’de bütün bağlayıcıların faz açısı değerlerinde sıcaklığın artışına paralel olarak bir artış meydana gelmiştir. Dolayısıyla bağlayıcıların sıcaklık artışıyla daha viskoz davrandıkları görülmektedir. Ancak bütün sıcaklıklarda katkı miktarının artmasına bağlı olarak saf bağlayıcıya göre %1 ve %3 nanosilika içeriğinde faz açıları artmasına rağmen; %5 nanosilika içeriğinde bir azalma meydana gelmiş ve %7 nanosilika içeriğinde tekrar bir yükselme eğilimi göstermiştir. Bu durumda %5 nanosilika içerikli modifiye bitümlerin saf ve diğer modifiye bitümlere göre daha elastik bir kıvama geldiğini ifade etmek mümkündür.

RTFOT sonrası bağlayıcılar üzerinde uygulanan DSR deneylerinden elde edilen $G^*/\sin\delta$ tekerlek izi parametresinin sıcaklıkla değişimi Şekil 4.12’de verilmiştir.



Şekil 4.12. RTFOT Sonrası Bağlayıcıların $G^*/\sin\delta$ Değerlerinin Sıcaklıkla Değişimi

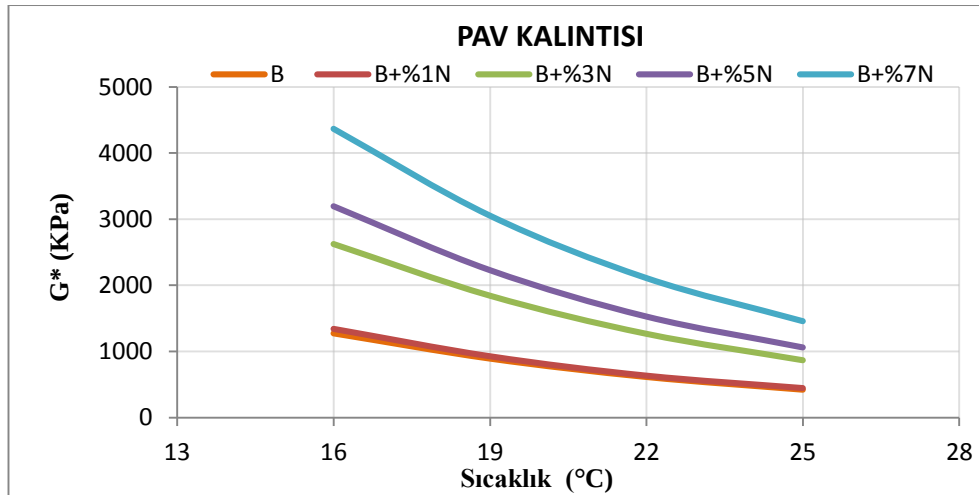
Superpave şartnamesine göre RTFOT kalıntısı bağlayıcıların $G^*/\sin\delta$ tekerlek izi parametresi değerlerinin min 2200 Pa olması istenmektedir. Çizelge 4.9 ve Şekil 4.12’de görüldüğü gibi saf bağlayıcının 58°C sıcaklıkta tekerlek izi parametresi bakımından şartname limitlerini sağladığı görülmüştür. Benzer şekilde modifiye bağlayıcılarında şartname limitlerini aynı sıcaklıkta sağladığı görülmektedir. Buna göre bütün bağlayıcıların yüksek sıcaklık performans seviyesi PG 58-Y olarak tespit edilmiştir. Ancak 58°C’deki tekerlek izi parametre değerleri dikkate alındığında saf bağlayıcıya göre %5 nanosilika modifiyeli bitümün değerinin saf bitüme göre %20,27 arttığı ancak diğer bağlayıcılarda ciddi bir azalma meydana geldiğinde görülmüştür. Bu sonuca göre aynı performans sınıfına sahip olmakla beraber %5

nanosilika modifiyeli bitümlerin daha yüksek kalıcı deformasyon direncine sahip olduğu söylenebilir.

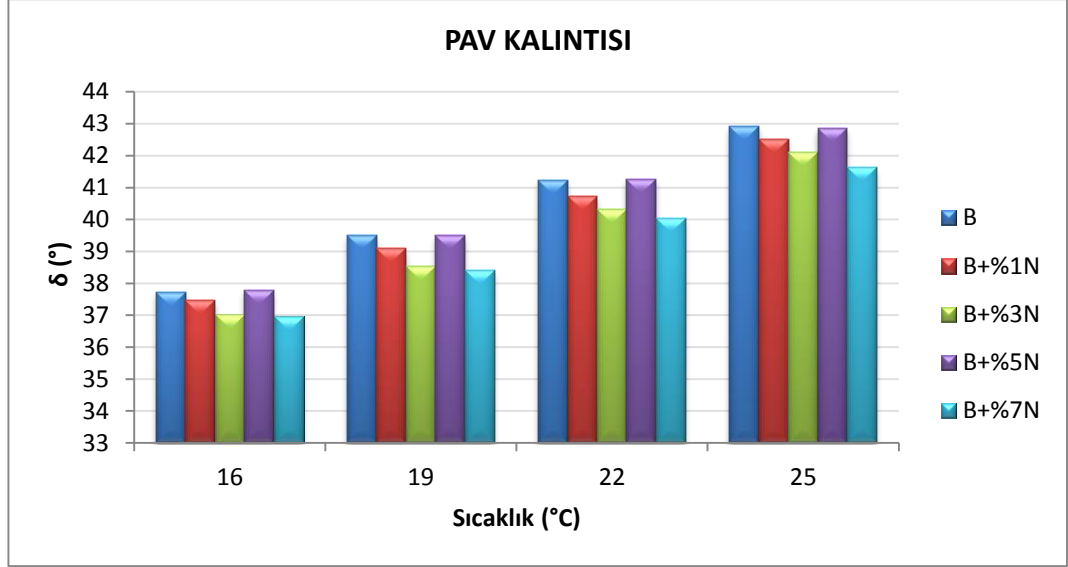
Bağlayıcıların orta sıcaklıklardaki yorulma dirençlerini belirlemek için PAV ile yaşlandırılmış numuneler üzerinde 16, 19, 22 ve 25°C sıcaklıklarda gerçekleştirilen DSR deney sonuçları Çizelge 4.10'da verilmiştir. PAV kalıntısı bağlayıcıların G^* (kayma modülü) ve δ (faz açısı) değerlerinin sıcaklıkla değişim grafikleri ise Şekil 4.13 ve 4.14'te gösterilmiştir.

Çizelge 4.10. PAV Kalıntısı Bağlayıcıların DSR Sonuçları

Numune Türü	Sıcaklık (°C)	B	B+%1N	B+%3N	B+%5N	B+%7N
		G^*				
P A V	16	1273,673	1342,89	2624,07	3195,09	4365,48
	19	892,731	926,562	1842,87	2229,24	3051,18
	22	615,187	631,918	1266,75	1528,55	2107,51
	25	422,868	443,13	867,052	1061,9	1455,25
	δ (°)					
	16	37,03	37,72	37,46	37,77	36,97
	19	38,53	39,51	39,08	39,5	38,41
	22	40,31	41,24	40,73	41,27	40,04
	25	42,11	42,92	42,51	42,85	41,63
	$G^*.\sin\delta$					
	16	767,048	821,584	1595,98	1956,97	2625,38
	19	556,104	589,491	1161,76	1417,97	1895,65
	22	397,979	416,57	826,548	1008,24	1355,81
	25	283,557	301,761	585,883	722,18	966,747



Şekil 4.13. PAV kalıntısı Bağlayıcıların Kayma Modülünün (G^*) Sıcaklıkla Değişimi

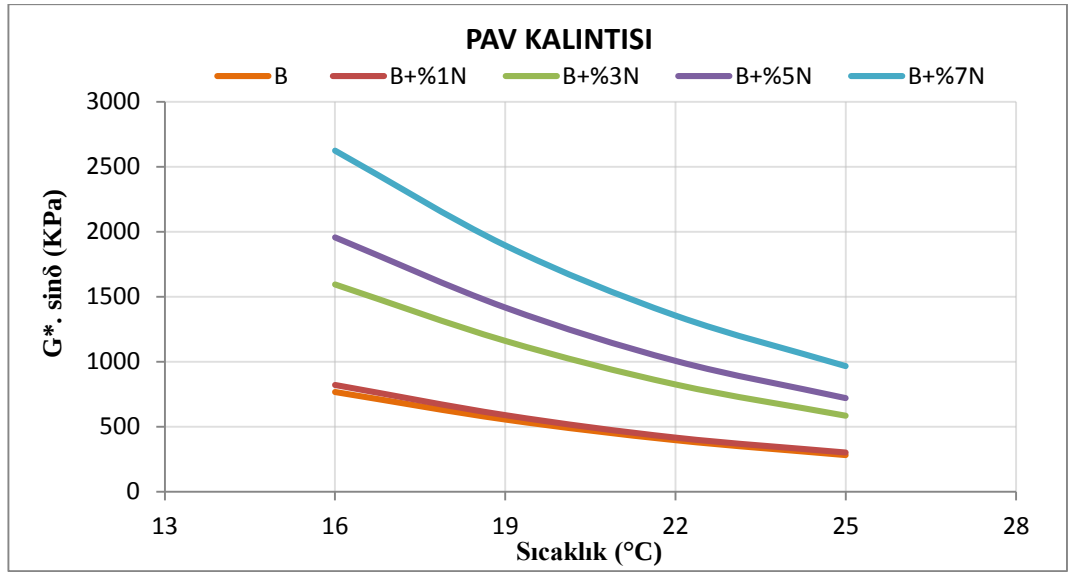


Şekil 4.14. PAV Kalıntısı Bağlayıcıların Faz Açılarının (δ) Sıcaklıkla Değişimi

Şekil 4.13'te görüldüğü gibi PAV kalıntısı bağlayıcılar üzerinde yapılan DSR deneyi sonucunda, kayma modülü (G^*) parametresinin sıcaklık arttıkça bütün bağlayıcılarda doğal olarak azaldığı görülmektedir. Ancak bütün sıcaklık değerleri incelendiğinde saf bağlayıcıya göre modifiye bağlayıcıların kayma modülü değerlerinde önemli artışlar olduğu görülmektedir. Bu artışlar 22°C sıcaklık için sırasıyla %5,43; %106; %150 ve %242 şeklinde meydana gelmiştir. Bu artış orta sıcaklıklarda nanosilika ilave edilmesiyle bağlayıcıların kayma deformasyonlarına karşı ciddi direnç gösterdiğini ifade etmektedir.

PAV kalıntısı bağlayıcılar üzerinde yapılan DSR deneyi sonucunda faz açısı değerlerinin sıcaklıkla arttığı Şekil 4.14'de görülmektedir. Faz açısının sıcaklıkla artması, bağlayıcının viskoz davranış gösterdiğini ifade etmektedir. Bütün sıcaklıklarda katkı miktarının artmasına bağlı olarak saf bağlayıcıya göre %1 ve %3 nanosilika içeriğinde faz açıları azalmasına rağmen, %5 nanosilika içeriğinde bir artma meydana gelmiş ve %7 nanosilika içeriğinde tekrar bir azalma eğilimi göstermiştir. Bu durumda %5 nanosilika içerikli modifiye bitümlerin saf bitümle benzer elastikiyet sergilediğini ifade etmek mümkündür.

PAV sonrası bağlayıcılar üzerinde uygulanan DSR deneylerinden elde edilen $G^* \cdot \sin \delta$ orta sıcaklıklardaki yorulma parametresi değerlerinin sıcaklıkla değişimi Şekil 4.15' de verilmiştir.



Şekil 4.15. PAV Sonrası Bağlayıcıların $G^*.sin \delta$ Değerlerinin Sıcaklıkla Değişimi

Şekil 4.15 incelendiğinde PAV kalıntısı bağlayıcıların Superpave şartnamesine göre $G^*.sin \delta$ değerlerinin 5000 kPa' yı aşmaması istenmektedir. %1, %3, %5 ve %7 nanosilika katkılı bağlayıcılarda tüm sıcaklıklarda katkı oranının artmasıyla yorulma parametresi olan $G^*.sin \delta$ değerlerinin şartname limitini sağladığı görülmektedir. Genel olarak bütün sıcaklıklarda bağlayıcıların yorulma parametreleri incelendiğinde katkı oranına bağlı olarak saf bağlayıcıya göre önemli artışlar meydana geldiği görülmektedir. 22°C sıcaklık göz önüne alındığında saf bağlayıcıya göre nanosilika ilaveli bağlayıcıların yorulma parametresi değerlerinde sırasıyla %4,67, %107, %153 ve %240 artış meydana geldiği görülmüştür. Bu artışlar nanosilika ilavesiyle bağlayıcıların daha rijit bir kıvama geldiğini göstermektedir. Bu durumun bütün sıcaklıklar içinde aynı şekilde gerçekleştiği görülmüştür. Ancak her bir sıcaklık için nanosilika artışıyla birlikte bağlayıcıların rijitliği artmış olmasına rağmen elastikiyet özelliklerini korudukları ve dolayısıyla yorulma direnci bakımından iyi bir performans gösterdikleri ifade edilebilir.

4.6.2. Kiriş Eğme Reometresi (BBR) Deneyi

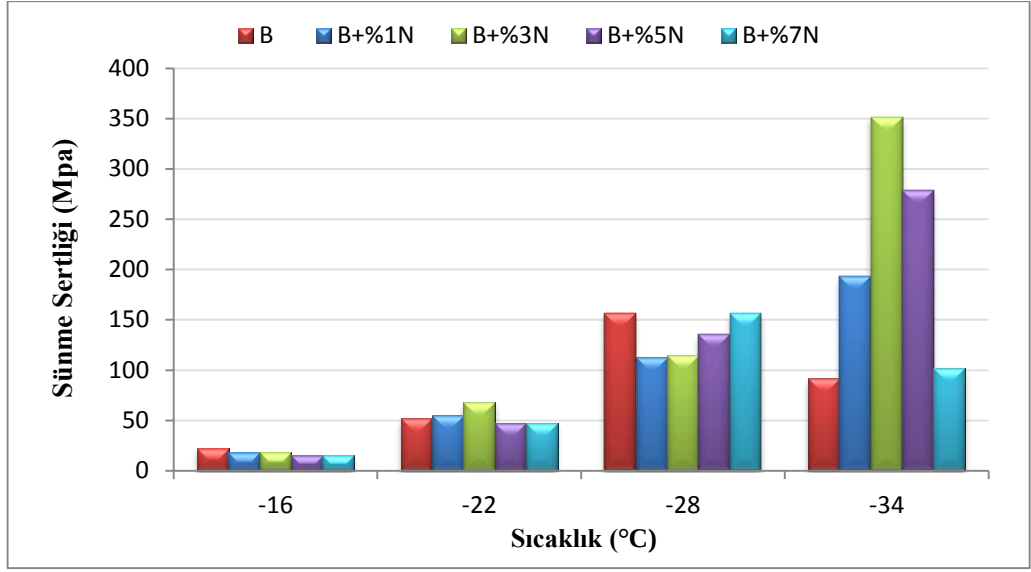
BBR deneyi ile bağlayıcıların düşük sıcaklık altındaki termal çatlaklara karşı gösterdiği direnç tespit edilmiştir. Deney PAV ile yaşlandırılmış asfalt numunelere uygulanmıştır. Saf ve nanosilika modifiyeli bağlayıcılar 150°C sıcaklıkta ısıtılıp, standart alüminyum kalıplara doldurulmuş ve soğumaya bırakılmıştır. Soğuyan numuneler kalıplardan çıkarılarak BBR cihazı içerisindeki soğutulmuş (-16°C ve -

22°C) sıvıya bırakılmıştır ve koşullandırma yapılmıştır. Deneyde kiriş numunesi cihaz mesnetleri arasına yerleştirilerek deney başlatılmış ve 240 saniye süreyle kiriş numuneye 980 ± 5 mN (100 ± 5 gr) yük uygulanmıştır. Deney bitiminde yük otomatik olarak kaldırıp, sünme sertliği ve m-değer değeri elde edilmiştir.

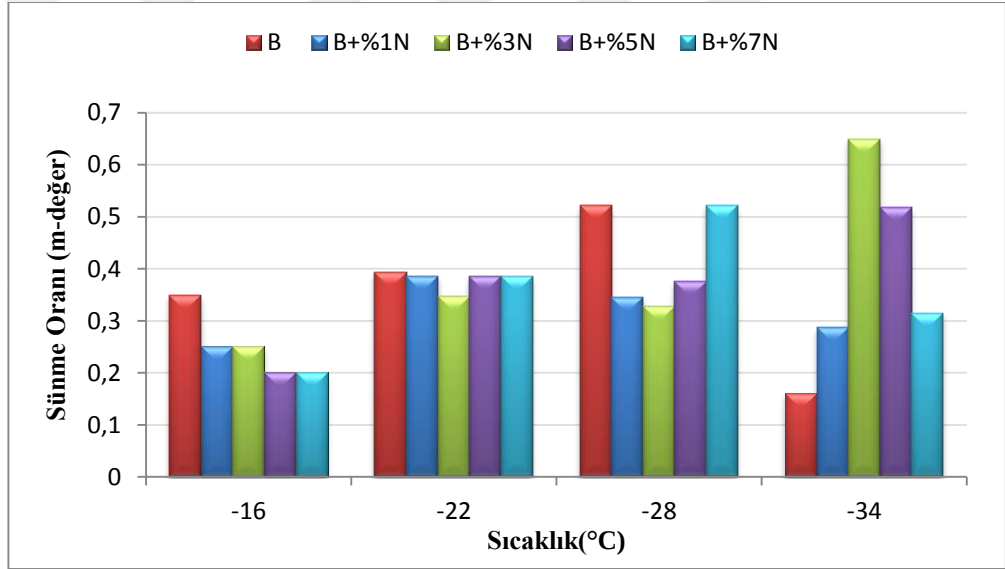
Saf ve nanosilika ilaveli bitümlerin BBR deney sonuçları Çizelge 4.11’de verilmiştir. Bağlayıcıların sünme sertliği ve sünme oranı (m-değer) değerlerinin sıcaklığa bağlı değişim grafikleri sırasıyla Şekil 4.16 ve 4.17’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.11. Bağlayıcıların BBR Deney Sonuçları

Bağlayıcı Türü	Sıcaklık (°C)	Sünme Sertliği (MPa)	m-değer
B	-16	21,98	0,349
	-22	52,18	0,393
	-28	156,37	0,522
	-34	91,28	0,161
B+%1N	-16	18,07	0,251
	-22	54,88	0,386
	-28	113,04	0,346
	-34	193,01	0,287
B+%3N	-16	17,82	0,251
	-22	67,58	0,347
	-28	114,41	0,328
	-34	351,59	0,65
B+%5N	-16	15,64	0,201
	-22	47,41	0,385
	-28	135,26	0,375
	-34	278,53	0,518
B+%7N	-16	15,64	0,201
	-22	47,41	0,385
	-28	156,37	0,522
	-34	102,29	0,315



Şekil 4.16. Bağlayıcıların Sünme Sertliğinin Sıcaklıkla Değişimi



Şekil 4.17. Bağlayıcıların Sünme Oranının (m-değer) Sıcaklıkla Değişimi

Superpave şartnamesine göre deney sıcaklığında bağlayıcının rijitlik değerinin 300 MPa'dan fazla olmaması, m-değer değerinin ise 0,300'den küçük olması gerekmektedir. Çizelge 4.11 ve Şekil 4.16-4.17'de görüldüğü gibi bütün bağlayıcıların sünme sertliği değeri 300 mPa'dan daha düşük elde edilmiştir. Bu durum nanosilika ilavesiyle bağlayıcıların rijitliğinde fazla bir değişim olmadığını hatta bağlayıcıların daha elastik bir kıvama geldiğini göstermektedir. Bununla birlikte Şekil 4.17'deki m-değer grafiğinde görüldüğü gibi sıcaklığa bağlı olarak bağlayıcıların sünme oranı değerlerinde bir artış meydana gelmiştir. Bağlayıcı sertliğindeki değişimi ifade eden bu durum nanosilika ilavesiyle modifiye

bağlayıcıların çok düşük sıcaklıklarda oldukça elastik bir yapı sergilediğini göstermektedir. Sünme sertliği ve m değeri birlikte değerlendirildiğinde saf 160/220 penetrasyon sınıfı bağlayıcısının düşük sıcaklık performans seviyesinin -28°C olduğu yani PG X-28 ile ifade edilebileceği görülmüştür. Benzer şekilde %1 nanosilika modifiyeli bağlayıcısında nanosilika içeriğine rağmen aynı seviyede kaldığı görülmüştür. Ancak nanosilika artışıyla %3, %5 ve %7 oranlarındaki modifiye bağlayıcıların saf bağlayıcıya göre bir seviye yani -6°C daha da düştüğü görülmüştür. Buna göre bu bağlayıcıların düşük sıcaklık performans seviyeleri -34°C olarak tespit edilmiştir. Bu durumda bu bağlayıcıların performans sınıflarının PG X-34 olduğu görülmüştür. Nanosilika ilavesinin bağlayıcıların düşük sıcaklıklarda oluşan çatlaklara karşı direnci üzerinde önemli derecede olumlu bir etkiye sahip olduğu görülmüştür.

Saf ve nanosilika modifiyeli bağlayıcıların yüksek ve düşük sıcaklıklardaki performans özellikleri birlikte değerlendirildiğinde, sırasıyla PG 58-28, PG58-28, PG 58-34, PG58-34, PG58-34 olduğu tespit edilmiştir.

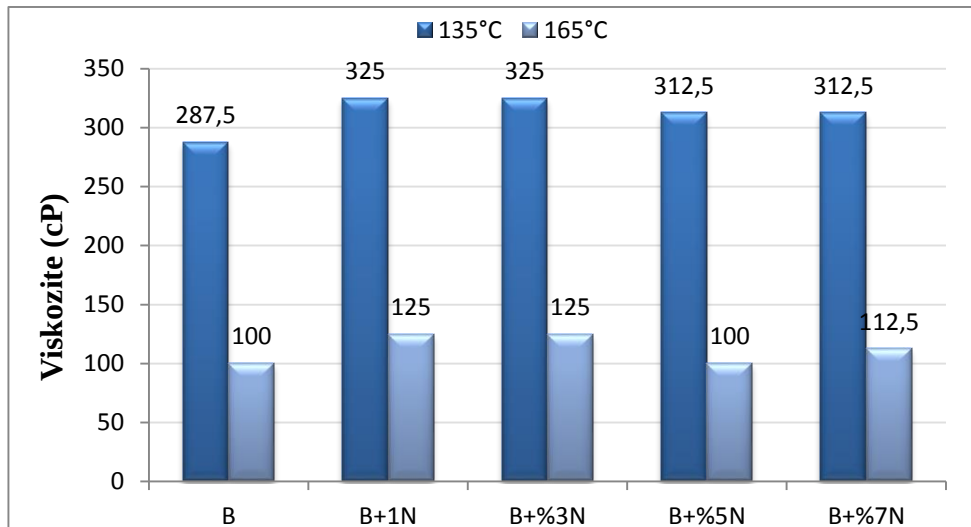
4.6.3. Dönel Viskozimetre (RV) Deneyi

Saf ve nanosilika modifiyeli bağlayıcıların plentteki karıştırma ve yoldaki sıkıştırma sıcaklıklarının tespiti için dönel viskozimetre (RV) deneyi yapılmıştır. Bu amaçla saf ve modifiyeli bitümler, 135°C ve 165°C sıcaklıkta deneye tabii tutulmuştur. Bağlayıcılar 150°C de ısıtılarak yaklaşık 11 gr. kadar viskozite kabına doldurulmuş ve kap deney cihazına yerleştirilmiştir. İstenilen deney sıcaklığına ulaşıldığında viskozimetre sıfırlanmış ve cihaz 20 rpm. hızına ayarlanmıştır. Cihaza no:27 mili takılıp deney başlatılmıştır. Deney esnasında sabit sıcaklığa gelen numune üzerinde otomatik olarak viskozite değeri saptanmıştır. Bu şekilde elde edilmiş olan saf ve nanosilika ilaveli bağlayıcıların RV sonuçları Çizelge 4.12’de verilmiştir.

Çizelge 4.12. Bağlayıcıların RV Sonuçları

Bağlayıcı Türü	Okumalar	Viskozite, cP	
		135°C	165°C
B	1	287,5	100
	2	287,5	100
	3	287,5	100
	Ortalama	287,5	100
B+%1N	1	325	112,5
	2	325	112,5
	3	325	112,5
	Ortalama	325	112,5
B+%3N	1	325	125
	2	325	125
	3	325	125
	Ortalama	325	125
B+%5N	1	312,5	100
	2	312,5	100
	3	312,5	100
	Ortalama	312,5	100
B+%7N	1	312,5	112,5
	2	312,5	112,5
	3	312,5	112,5
	Ortalama	312,5	112,5

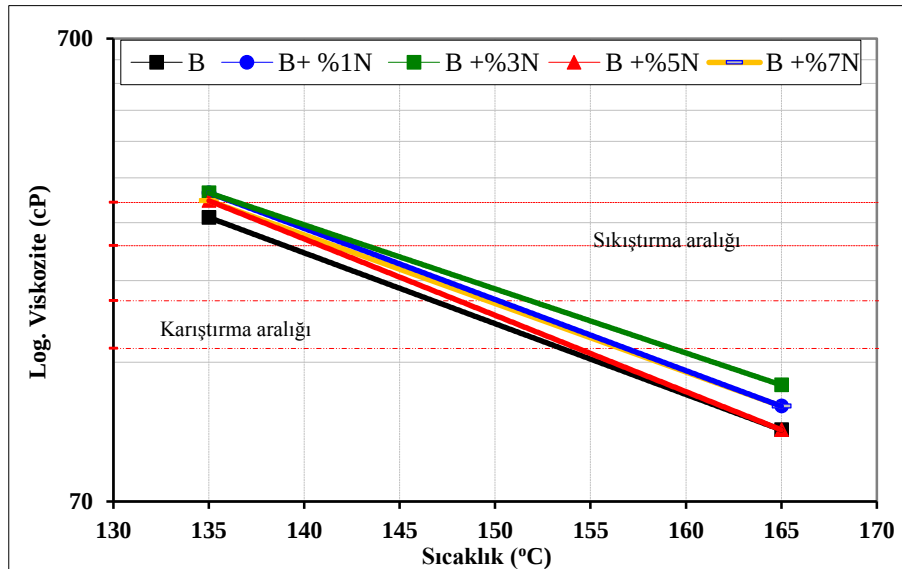
Saf ve nanosilika ilaveli bağlayıcıların 135°C ve 165°C sıcaklıklardaki ortalama viskozite değerleri arasındaki ilişki Şekil 4.18 'de gösterilmiştir.



Şekil 4.18. Bağlayıcıların 135°C ve 165°C Sıcaklıktaki Viskozite Değişimi

Şekil 4.18’de görüldüğü gibi 135°C sıcaklıkta B160/220 saf bitüme nanosilika ilavesiyle tüm yüzdelerde viskozite değerinde artış görülmüştür. Bu artışlar saf bitüme göre sırasıyla %13,04; %13,04; %8,69 ve %8,69 şeklinde olmuştur. Bu sonuç, bağlayıcı akıcılığının nanosilika ilavesiyle azaldığı anlamına gelmektedir. 165°C sıcaklıkta ise bağlayıcıların viskozite değerlerinde başlangıçta bir artış, sonra düşüş ve tekrar yükselme gözlenmiştir. Saf bitüme göre meydana gelen değişimler sırasıyla %25, %25 artış, saf bitümle aynı değerde ve yeniden %12,5 artış şeklindedir. Bu sonuç, 165°C sıcaklık için modifiye bağlayıcıların saf asfalta göre daha akıcı bir hale geldiğini göstermektedir. Ayrıca bağlayıcıların viskozite değerinin 135°C’de 3000 cP’yi aşmaması olumlu olarak yorumlanmaktadır.

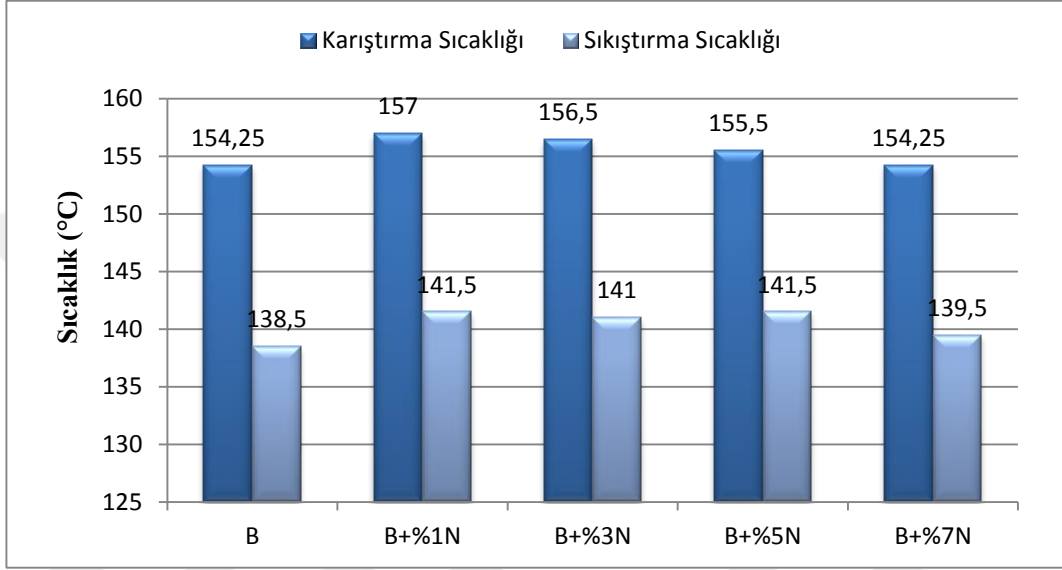
Bitümlü bağlayıcıların agrega ile plentte karıştırılırken ve arazide sıkıştırma işlemi yapılırken belirli bir işlenebilirliğe sahip olması gerekir. BSK’nın karıştırılmasında bitümlü bağlayıcıların 170 ± 20 cP, sıkıştırılmasında ise 280 ± 30 cP viskozite değerine sahip olması istenmektedir [9]. Bu viskozite 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 yararlanılmıştır. Saf ve nanosilika ilaveli bağlayıcıların viskozite-sıcaklık grafikleri Şekil 4.19’da gösterilmiştir. Ayrıca bu bağlayıcıların karıştırma ve sıkıştırma sıcaklık aralıkları, bu grafikler yardımıyla belirlenmiş Çizelge 4.13’de verilmiştir.



Şekil 4.19. Bağlayıcıların Viskozite-Sıcaklık İlişkisi

Çizelge 4.13. Bağlayıcıların Karıştırma ve Sıkıştırma Sıcaklık Aralıkları

Bağlayıcı Türü	Karıştırma aralığı (°C)	Sıkıştırma aralığı (°C)
B	151-157,5	135-142
B+%1N	154-160	137-146
B+%3N	153-158	137-145
B+%5N	153-158	137-145
B+%7N	154-160	135-144



Şekil 4.20. Bağlayıcıların Karıştırma- Sıkıştırma Sıcaklık Değerleri

Saf ve nanosilika ilaveli bağlayıcıların ortalama karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları arasındaki ilişki Şekil 4.20’de gösterilmiştir.

Şekil 4.20 incelendiğinde, B 160/220 bağlayıcı için karıştırma ve sıkıştırma sıcaklığı sırasıyla 154,5°C ve 138,5°C olarak belirlenmiştir. B160/220 saf bağlayıcıya artan oranlarda (%1, %3, %5 ve %7) nanosilika eklenmesiyle elde edilen modifiye bitümlerin karıştırma sıcaklıklarında saf bağlayıcıya göre sırasıyla %1,78; %1,45; %0,81 artış gösterirken %7 nanosilika ilaveli karışımın değeri saf bağlayıcıyla aynı değere kalmıştır. Saf bağlayıcıya nanosilika ilavesiyle elde edilen modifiye bitümlerin sıkıştırma sıcaklıklarında ise saf bağlayıcıya göre sırasıyla %2,16; %1,80; %2,16 ve %0,72 artış meydana gelmiştir. Tüm bu verilere göre saf bağlayıcıya nanosilika eklenmesiyle elde edilen modifiye bağlayıcıların sıcaklık etkisi incelendiğinde büyük değişimlerin meydana gelmediği, bağlayıcıların genel olarak kıvamını koruduğu, bazı yüzdelerde saf bitüme göre daha az enerji harcanacağı ve bazı yüzdelerde ise saf bitüm ile yaklaşık aynı düzeyde enerji

harcanacağı veya ısı isteyeceği görülmektedir. Penetrasyon sınıfı B160/220 olan saf bitüme nanosilika ilave edildiğinde bütün oranlarda bağlayıcı sınıfının B100/150 penetrasyon sınıfı bir bitüme dönüştüğü göz önüne alındığında, nanosilika katkısı ile elde edilen bağlayıcıların sertliklerinin artmasına rağmen, agrega ile karıştırılması ve sıkıştırılması esnasında, saf bitüm ile yaklaşık aynı sıcaklıkların gerekeceği, saf bitüme harcanacak olan enerji ile aynı düzeylerde enerji harcanacağı yani nanosilika ilaveli bağlayıcıların, saf bağlayıcı ile aynı karıştırma ve sıkıştırma sıcaklığında karıştırılması gerektiği, bu şekilde enerji tasarrufunun da sağlanacağını söylemek mümkündür.

4.7. Modifiye Karışımların Hazırlanması

Bu çalışmada, nanosilikanın bitümlü sıcak karışımlarda kullanılmasının, karışımın performans özellikleri üzerinde göstermiş olduğu iyileştirmenin görülebilmesi ve değerlendirilebilmesi amacıyla, Marshall dizayn yöntemine göre karışım numuneleri hazırlanmıştır. Bu amaçla, başlangıçta B160/220 penetrasyonlu bağlayıcı kullanılarak Marshall tasarım yöntemine göre optimum asfalt içeriği tespit edilmiştir. Bu asfalt içeriğinde daha önce hazırlanmış olan nanosilika modifiyeli bağlayıcılar ile Marshall tasarım yöntemi kullanılarak nanosilika modifiyeli karışım numuneleri hazırlanmıştır.

Hazırlanmış olan saf ve modifiye karışım numuneleri B, B+%1N, B+%3N, B+%5N ve B+%7N olarak isimlendirilmiştir. Bu numuneler üzerinde performans deneyleri uygulanarak nanosilikanın karışımların performans özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

4.7.1. Marshall Numunelerinin Hazırlanması

Marshall dizayn yöntemi kullanılarak hazırlanacak olan numunelerde, her bitüm yüzdesi için üç numune hazırlanmış ve bu numunelerde kullanılacak olan bağlayıcının miktarı, kuru agrega ağırlığının yüzdesi alınarak belirlenmiştir. Tartımı yapılan agrega numuneleri 165°C sıcaklıkta, bitümlü bağlayıcı ise 155°C sıcaklığa kadar ısıtılmıştır. Isıtılmış olan agrega, karıştırma kabına aktarılarak orta kısmına bir çukur açılmış ve ısıtılan bağlayıcı belirli miktarda buraya dökülmüştür. Agrega, bitümlü bağlayıcı ile tamamıyla kaplanıncaya kadar karıştırma cihazında karıştırılmıştır. Karıştırma işlemi yaklaşık 1-2 dk. içerisinde yapılmıştır. Çalışmada kullanılan karıştırma cihazı Şekil 4.21’de gösterilmiştir.



Şekil 4.21. Karıştırma Cihazı

Karıştırma işlemi bittikten sonra, daha önceden temizlenip 160°C ısıtılmış olan kalıpların içerisine, malzeme dökülmeden önce kalıp çapına göre uygun kesilmiş aydinger kağıdı kalıp tabanına koyulmuştur. Malzemede ayrışma olmamasına özen gösterilerek daha önceden ısıtılmış olan kürek yardımıyla kalıp içerisine malzeme koyulmuştur. Kalıba koyulan malzemenin zaman kaybedilmeden 15 defa kenarlarına ve 10 defa orta kısmına sıcak cam çubuk ile şişleme işlemi yapılmıştır. Numune üzerine tekrar aydinger kağıdı koyularak ve sıkıştırma işlemi için tokmağa yerleştirilmiştir. 457 mm. yüksekten serbest olarak düşen tokmak ile 75 defa ön yüze, 75 defa da arka yüze olmak üzere toplam 150 vuruş yapılmıştır. Sıkıştırma için kullanılan Marshall tokmağı Şekil 4.22’de gösterilmiştir.

Hazırlanmış olan briketler 24 saat kalıpta bekletildikten sonra krika yardımıyla (Şekil 4.23(a)) kalıptan çıkartılmıştır. Çıkarılan numunelerin üst ve alt yüzeyleri spatula yardımıyla düzeltilmiş ve numunelerin yükseklikleri kumpas yardımıyla en az üç yerden ölçülüp kaydedilmiştir (Şekil 4.23(b)). Yükseklikleri alınan numunelerin ilk olarak havadaki kuru ağırlıkları alınmıştır. Daha sonra numunelerin Arşimet terazisinde sudaki ağırlıkları alınmıştır. Çıkarılan numunelerin doymun hale getirilmesi için 3-5 dk. kadar su banyosunda tüm yüzeyi su ile kaplanacak şekilde suda bekletildikten sonra süresi dolan numune havlu yardımıyla yüzeyinde parlaklık kalmayacak şekilde kurutulup tartılmış ve suya doymun kuru yüzey ağırlığı belirlenmiştir.



Şekil 4.22. Marshall Tokmağı



Şekil 4.23. Numunelerin Krikoyla Çıkarılması (a) ve Kumpasla Yüksekliğin Ölçülmesi (b)

Hesaplanan bu ağırlıklar, numunelerin özgül ağırlığının, boşluk oranının ve bitümle dolu boşluk oranının tespitinde kullanılmaktadır. Ayrıca numunelerin belirlenen bazı fiziksel özellikleri diğer deneylerde de kullanılmaktadır.

Deneye hazır duruma getirilen numunelerin stabilite ve akma değerlerinin belirlenmesi için numuneler 60°C suda 30-40 dk. kadar bekletilir. Sudan çıkarılan numuneler Marshall stabilite cihazına yerleştirilir ve akma çubuğu sabitlenir. Daha sonra yüklemeye başlanır. En yüksek yükleme değeri ve buna karşılık gelen akma değeri cihaz tarafından ekranda otomatik olarak gösterilir ve kaydedilir. Marshall stabilite ve akma cihazı Şekil 4.24'te gösterilmiştir.



Şekil 4.24. Marshall Stabilite ve Akma Cihazı

4.7.1.1. Optimum Bitüm Yüzdesinin Bulunması

Optimum bitüm oranının bulunması için karışımda kullanılacak olan agreganın miktarı sabit tutularak, agreganın ağırlığının %3,5; %4; %4,5; %5; %5,5; %6; %6,5 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. Agreganın efektif özgül ağırlığının (G_{se}) hesabı için agreganın hacmi ve zahiri özgül ağırlıklarının ortalaması alınmıştır. Daha sonra formüller 4.3-4.16 kullanılarak numunelerin hacim özgül ağırlıkları (D_p), boşluk oranları (V_h), agregalar arası boşluk oranları (V_{MA}) ve asfaltla dolu boşluk oranları (V_f) belirlenmiştir. Daha sonra numuneler Marshall stabilite aletinde 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.

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

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

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

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

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

$$G_{sb} = \frac{100}{\left(\frac{\%K}{G_k - \square}\right) + \left(\frac{\%I}{G_i - \square}\right) + \left(\frac{\%F}{G_f - z}\right)} \quad (4.8)$$

$$Gsa = \frac{100}{\left(\frac{\%K}{Gk-z}\right) + \left(\frac{\%I}{Gi-z}\right) + \left(\frac{\%F}{Gf-z}\right)} \quad (4.9)$$

$$Gse = \frac{Gsa + Gsb}{2} \quad (4.10)$$

$$Dt = \frac{100}{\left(\frac{100-Wb}{Gse}\right) + \left(\frac{Wb}{Gb}\right)} \quad (4.11)$$

$$V\Box = \frac{Dt - Dport}{Dt} \times 100 \quad (4.12)$$

$$Vb = (Pbe \times Dport) / Gb \quad (4.13)$$

$$Va = 100 - (Vh + Vb) \quad (4.14)$$

$$Vma = 100 - Va = (Vh + Vb) \quad (4.15)$$

$$Vf = (Vb / Vma) \times 100 \quad (4.16)$$

W_a: Agregaya göre seçilen bitüm %'si

W_b: Karışıma göre seçilen bitüm %'si

W_A: Toplam agregaya 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 agregaya hacmi %'si

V_{ma}: Agregalar arasındaki boşluk %'si

V_f: V_{ma}'nın bitümle dolu boşluk %'si

P_{be}: Agregaya ağırlığına göre efektif bitüm %'si

G_{sb}: Agregaya hacim özgül ağırlığı

G_{se}: Efektif özgül ağırlığı

%K: Karışımındaki kaba agregaya %'si

%İ: Karışımdaki ince agrega %'si

%F: Karışımdaki filler %'si

Hazırlanan deney numunelerinden %3,5 bitüm içeren 1. Numuneye ait gerekli ölçüm ve hesaplamalar aşağıda gösterilmiştir:

Kaba agrega = %42, Gk-h = 2,676 gr/cm³, Gk-z = 2,744

İnce agrega = %53, Gi-h = 2,624 gr/cm³, Gi-z = 2,750

Filler = %5, Gf-z = 2,727 gr/cm³

Bitüm oranı = %3,5, Gb= 1,031gr/cm³

Agrega toplam ağırlığı = 1100 gr

Wa = (38,50/1100) x100 = 3,5

Wb = (38,50/(38,50+1100))x100 = 3,38

V = 1143,64 – 656,43= 487,21 cm³

Dp = 1136,38/ 487,21 = 2,332 gr/cm³

Dp_{ort} = (2,332+ 2,326+ 2,336) = 2,331 gr/cm³

$Gsb = \frac{100}{\left(\frac{42}{2,676}\right) + \left(\frac{53}{2,624}\right) + \left(\frac{5}{2,727}\right)} = 2,651 \text{ gr/cm}^3$

$Gsa = \frac{100}{\left(\frac{42}{2,744}\right) + \left(\frac{53}{2,75}\right) + \left(\frac{5}{2,727}\right)} = 2,746 \text{ gr/cm}^3$

$Dt = \frac{100}{\left(\frac{100-3,38}{2,699}\right) + \left(\frac{3,38}{1,031}\right)} = 2,559 \text{ gr/cm}^3$

Vh= [(2,559- 2,331) / 2,559]x 100 = %8,88

Vb = (2,72x 2,331) / 1,031= % 6,15

Va = 100 - (8,88+6,15) = %84,97

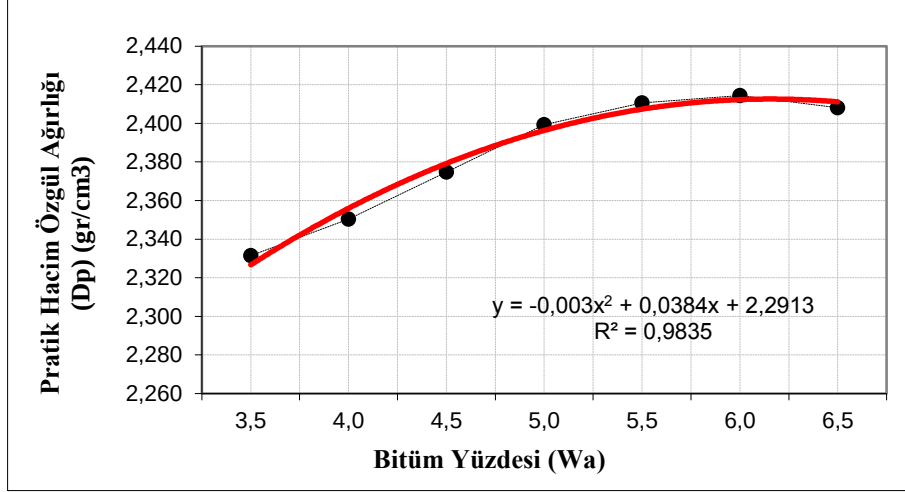
Vma = 100 – 84,97 = %15,03

Vf = (6,15/15,03) x100 = %40,92

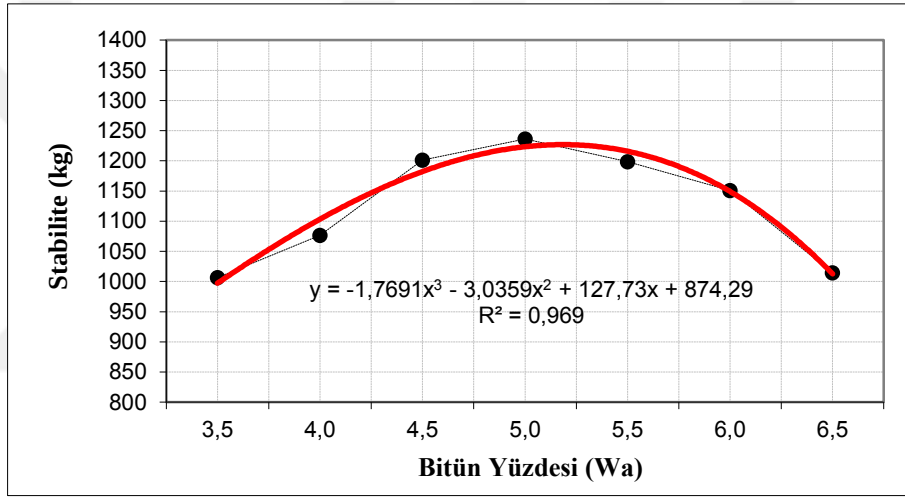
Aynı şekilde her bitüm yüzdesi ve her numune için hesaplamalar yapılmış olup tabloya aktarılmıştır. Elde edilen tüm sonuçlar Çizelge 4.14'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.14. Marshall Dizayn Yöntemiyle B160/220 Saf Karışımın Optimum Bitüm Belirlenmesine Ait Deney Sonuçları

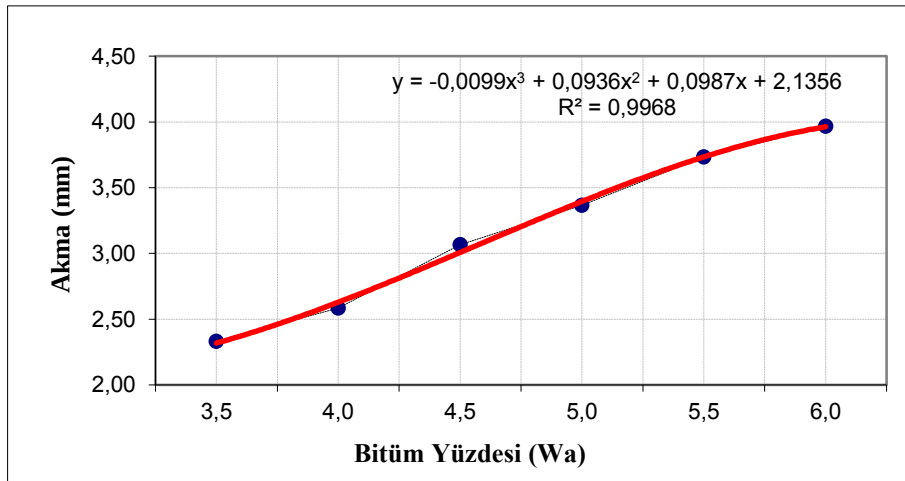
N	W (%)	W (%)	WB (gr)	Numune Yüksekliği			A (gr)	C (su) (gr)	B (gr)	V (cm ³)	Dp (gr/cm ³)	Dt (gr/)	Vh (%)	Vb (%)	Va (%)	Vm (%)	Vf (%)	Akm (mm)	Stb. (kN)	Dz.Fak	Dz.St (kG)
	3,5	3,3	38,5	1	2	3	Ort														
1				62,	62	62,	62,18	1136,4	656,4	1143,6	487,2	2,332						2,34	9,8	1,045	10,24
2				61,	62,	61,	61,8	1130,7	652,7	1138,9	486,2	2,326						2,13	9,8	1,050	10,29
3	2,8	2,7		61,	61,	61,	61,79	1126,7	652,0	1134,3	482,3	2,336						2,52	9,2	1,050	9,66
								ORTALAMALAR			2,331	2,5	8,8	6,1	84,9	15,0	40,9	2,33			10,06
4	4,0	3,8	44,0	61,	61,	61,	61,37	1136,6	660,3	1142,9	482,6	2,355						2,8	10	1,067	10,67
5				61,	61,	61,	61,5	1133	656,7	1139,5	482,8	2,347						2,54	10	1,063	10,63
6	3,3	3,1		61,	61,	61,	61,4	1131,5	656,8	1138,4	481,6	2,349						2,41	10,3	1,066	10,99
								ORTALAMALAR			2,350	2,5	7,4	7,2	85,2	14,7	49,2	2,583			10,76
7	4,5	4,3	49,5	61,	60,	60,	60,86	1141,5	663,1	1144,2	481,1	2,373						3	11,5	1,081	12,43
8				61,	60,	60,	60,8	1139,9	662,4	1141,1	478,8	2,381						3,10	10,5	1,083	11,37
9	3,8	3,6		61,	61,	61,	61,15	1136,7	659,4	1138,9	479,5	2,371						3,10	11,4	1,073	12,23
								ORTALAMALAR			2,375	2,5	5,8	8,4	85,7	14,2	58,9	3,067			12,01
1	5,0	4,7	55,0	60,	60,	60,	60,36	1142,1	666,8	1142,9	476,1	2,399						3,5	11,5	1,095	12,59
1				60,	60,	60,	60,3	1141	667,9	1141,7	473,9	2,408						3,30	10,8	1,097	11,85
1	4,3	4,1		60,	60,	60,	60,54	1144,8	667,0	1145,7	478,7	2,391						3,30	11,6	1,090	12,64
								ORTALAMALAR			2,399	2,5	4,2	9,5	86,2	13,8	69,3	3,367			12,36
1	5,5	5,2	60,5	60,	60,	60,	60,41	1146,4	671,5	1147,1	475,6	2,411						4	11,3	1,094	12,36
1				60,	60,	60,	60,4	1145,3	670,3	1145,6	475,3	2,410						3,50	10,7	1,094	11,71
1	4,8	4,5		60,	60,	60,	60,14	1148,7	672,9	1149,2	476,3	2,412						3,70	10,8	1,101	11,89
								ORTALAMALAR			2,411	2,4	3,1	10,	86,1	13,8	77,2	3,733			11,99
1	6,0	5,6	66,0	60,	60,	60,	60,26	1151,8	675,5	1152,4	476,9	2,415						3,8	10,1	1,098	11,09
1				60,	60,	60,	60,5	1155,3	676,6	1156,0	479,4	2,410						3,80	10,7	1,091	11,67
1	5,3	5,0		59,	59,	60,	59,83	1149,2	674,4	1149,7	475,3	2,418						4,30	10,6	1,110	11,77
								ORTALAMALAR			2,414	2,4	2,3	11,	85,9	14,0	83,3	3,967			11,51
1	6,5	6,1	71,5	60,	60,	60,	60,07	1154	676,3	1154,6	478,3	2,413						3,55	11,2	1,103	12,35
2				60,	60,	60,	60,0	1148,9	672,4	1149,5	477,1	2,408						3,10	11,3	1,105	12,49
2	5,8	5,4		60,	60,	60,	60,15	1157,8	676,6	1158,3	481,7	2,404						3,30	11,1	1,101	12,22
								OPTİMUM BİTÜM ORANI SONUÇLARI			2,408	2,4	1,9	12,	85,3	14,7	86,7	3,317			12,35



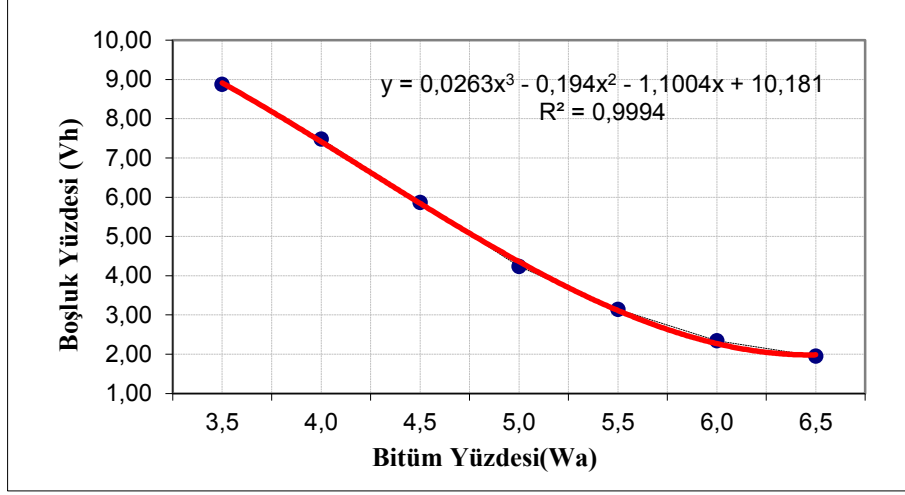
Şekil 4.25. Dp- Bitüm %'si



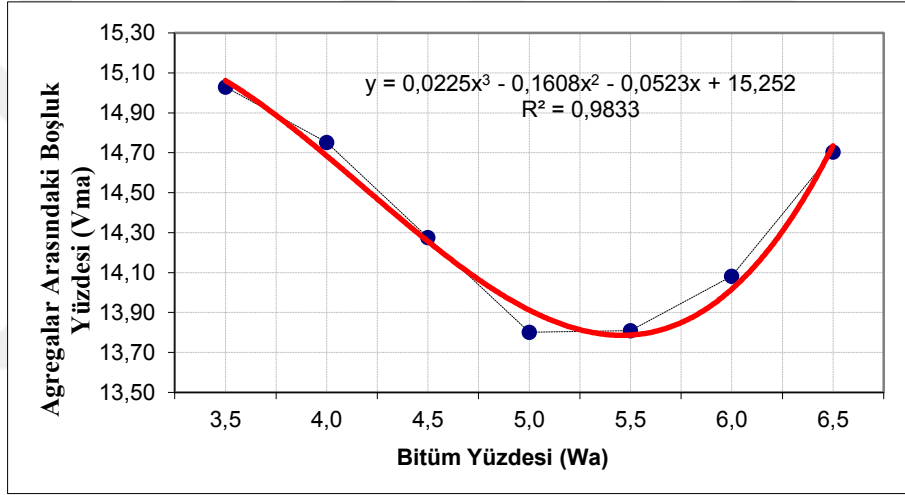
Şekil 4.26. Stabilite- Bitüm %'si ilişkisi



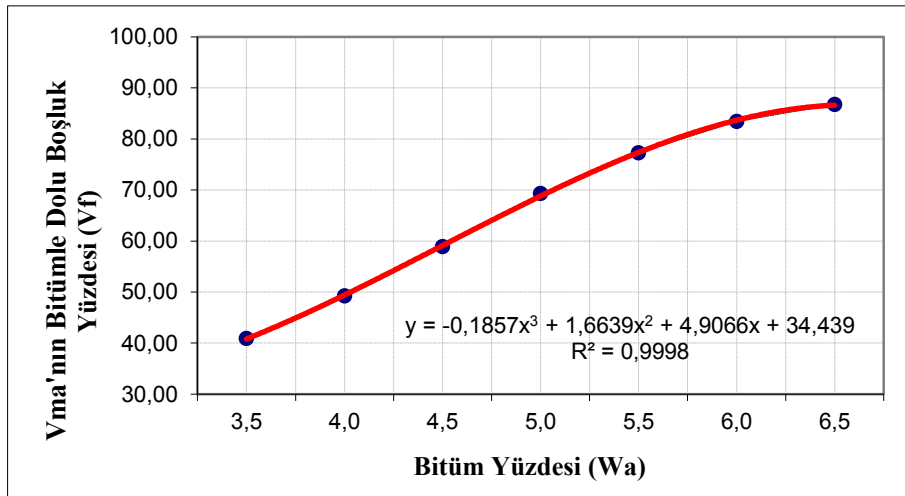
Şekil 4.27. Akma – Bitüm %'si



Şekil 4.28. Vh- Bitüm %'si



Şekil 4.29. VMA- Bitüm %'si



Şekil 4.30. Vf- Bitüm %'si

Çizilmiş olan bu grafikler yardımıyla asfalt karışımlar için gerekli olan optimum bitüm oranı hesabı yapılmıştır. Bunun için boşluk oranının %4'e, asfaltla dolu boşluk oranının %70'e, stabilite ve hacim özgül ağırlığın maksimum değere karşılık geldiği yüzdeler alınmıştır. Bulunan değerlerin aritmetik ortalaması alınarak karışımın optimum bitüm yüzdesi %5,2 olarak belirlenmiştir. Çizelge 4.15'de optimum bitüm içeriğinde kullanılan hesaplamalar gösterilmiştir.

Çizelge 4.15. Optimum Bitüm İçeriğinde Kullanılan Değerler

Kriterler	Sonuçlar
Max. Dp	5,8
Max. Stabilite	5,1
%4 V _h	5
%70 V _f	5
Optimum bitüm oranı	%5,2

Belirlenen optimum bitüm yüzdesine göre saf bitüm ile 3 adet kontrol karışım numunesi hazırlanmış ve sonuçları Karayolları Teknik Şartnamesi (KTŞ) ile karşılaştırılmıştır. Kontrol numunelerinin ortalama sonuçları Çizelge 4.16'da verilmiştir.

Çizelge 4.16. Kontrol Numunesine Ait Sonuçlar

No	Wa	Wb	WB	Numune 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)
1	5,2	4,94	57,20	59,55	59,13	59,39	59,36	1144,30	671,90	1147,20	475,3	2,408							2,596	10	1,13	1125
2				59,69	59,86	60,01	59,85	1152,00	674,30	1154,50	480,2	2,399							2,59	10,8	1,10	1186
3	4,51	4,29		59,76	59,50	59,96	59,74	1147,90	673,50	1150,80	477,3	2,405							2,52	10,3	1,11	1146
OPTIMUM BİTÜM SONUÇLARI												2,404	2,499	3,80	10,01	86,19	13,81	72,49	2,569			1152
ŞARTNAME LİMİTLERİ												FB<1,5=	0,77	(3-5)			>14	(68-75)	(2-4)	St/Ak=	448,58	>900

Çizelgede görüldüğü gibi bütün sonuçlar şartname limitlerini sağlamıştır. Belirlenen bu optimum bitüm oranı kullanılarak saf ve nanosilika modifiyeli karışımlar hazırlanmış ve performans deneylerine tabi tutulmuştur.

4.8. Karışımlar Üzerinde Uygulanan Performans Deneyleri

Çalışmada Marshall karışım dizayn yöntemiyle bulunan optimum bitüm içeriğinde saf ve nanosilika katkılı modifiye bitümlü karışımlar üzerinde Marshall stabilite ve akma deneyi, kalıcı Marshall stabilitesi (RMS), dolaylı çekme

mukavemeti (ITSM) deneyi, indirekt çekme rijitlik modülü (ITS) deneyi ve statik sünme deneyleri yapılmıştır.

Performans deneylerinde kullanılmak amacıyla hazırlanan numune sayıları Çizelge 4.17’de verilmiştir.

Çizelge 4.17. Performans Deneylerinde Kullanılan Numune Sayıları

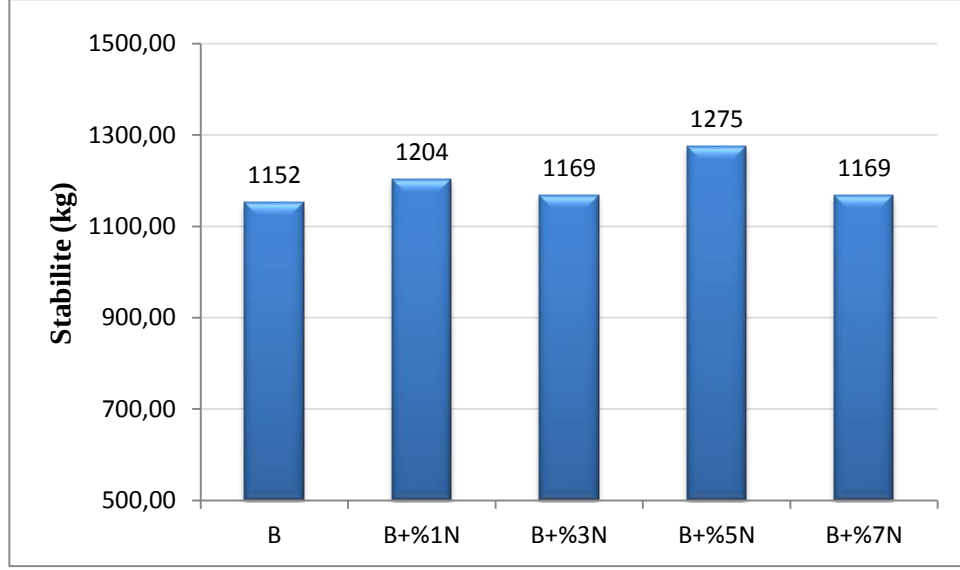
Performans Deneyleri	Karışım Türü				
	B	B+%1N	B+%3N	B+%5N	B+%7N
Marshall stabilite ve akma Deneyi	3	3	3	3	3
RMS Deneyi	3	3	3	3	3
ITS Deneyi	6	6	6	6	6
ITSM Deneyi	3	3	3	3	3
Sünme Deneyi	3	3	3	3	3
Toplam	18	18	18	18	18
Genel Toplam	90				

4.8.1. Marshall Stabilite ve Akma Deneyi

Saf bitüm (160/220) ve %1, %3, %5 ve %7 nanosilika ilaveli modifiye bitümlü karışımlar kullanılarak optimum bitüm içerikli hazırlanan numuneler üzerinde Marshall stabilite ve akma deneyi yapılmıştır. TS EN 12697-34 standardına göre 60°C suda yaklaşık 30-40 dk. kadar bekletilen numuneler çıkarıldıktan sonra deneye tabii tutulmuştur. Elde edilen sonuçlar Çizelge 4.18’de verilmiştir. Stabilite değerlerinin katkı miktarı ile değişimi Şekil 4.31’de gösterilmiştir. Akma değerlerinin katkı miktarı ile değişimi Şekil 4.32’de gösterilmiştir. Ayrıca numunelerin, stabilite değerinin akma değerine bölünmesiyle, Marshall oranı (MQ) değerleri de elde edilmiş olup MQ- katkı miktarı değişimi Şekil 4.33’de verilmiştir.

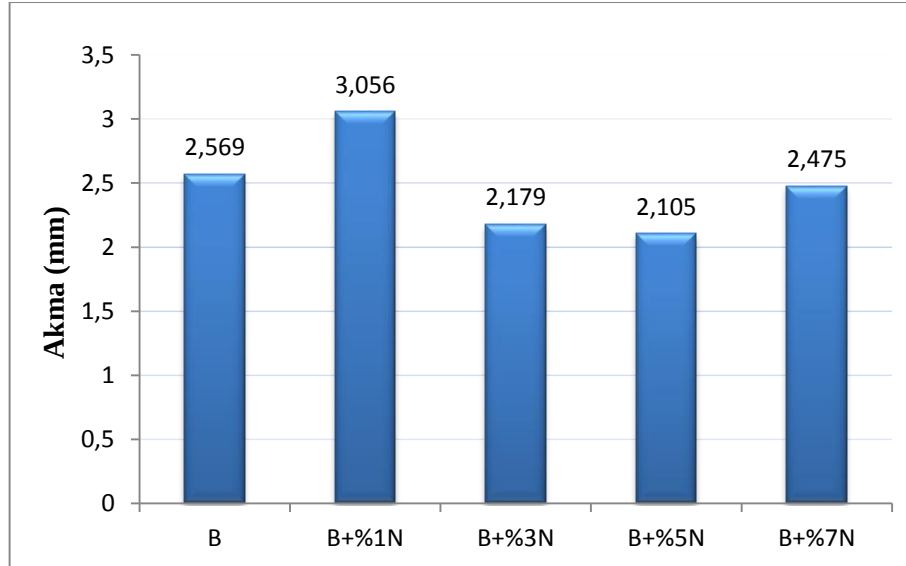
Çizelge 4.18. Nanosilika İlaveli Karışım Numunelerinin Marshall Stabilite ve Akma Değerleri

N	Wa (%)	W (%)	WB (gr)	Numune Yüksekliği			A (gr)	C (su) (gr)	B (gr)	V (cm ³)	Dp (gr/cm)	Dt (gr/c)	Vh (%)	Vb (%)	Va (%)	Vm (%)	Vf (%)	Akm (mm)	Stb. (kN)	Dz.Fa	Dz.St (kG)	
			1	2	3	Ort																
1	5,2	4,9	57,2	59,5	59,1	59,3	59,3	1144,3	671,9	1147,2	475,3	2,408						2,596	10	1,13	1125	B
2				59,6	59,8	60,0	59,8	1152,0	674,3	1154,5	480,2	2,399						2,59	10,8	1,10	1186	
3	4,5	4,2		59,7	59,5	59,9	59,7	1147,9	673,5	1150,8	477,3	2,405						2,52	10,3	1,11	1146	
OPTİMUM BİTÜM SONUÇLARI																						
4	5,2	4,9	57,2	60,2	59,9	60,1	60,0	1149,1	674,6	1152,6	478	2,404						3,42	11,2	1,103	1236	B+%1N
5				59,6	59,5	59,8	59,6	1145,7	672,3	1148,7	476,4	2,405						2,82	10,6	1,115	1184	
6	4,5	4,2		59,5	59,8	59,6	59,6	1147,2	674,2	1149,3	475,1	2,415						2,93	10,7	1,115	1193	
ORTALAMALAR																						
7	5,2	4,9	57,2	59,7	59,8	60,1	59,8	1148,1	673,5	1151,5	478	2,402						2,081	10,3	1,109	1138	B+%3N
8				60	59,9	60,4	60,1	1150,3	674,8	1151,4	476,6	2,414						2,28	10,8	1,102	1185	
9	4,5	4,2		59,8	60,2	59,8	59,9	1147,2	672,8	1150,2	477,4	2,403						2,18	10,7	1,107	1184	
ORTALAMALAR																						
10	5,2	4,9	57,2	61,0	61,4	61,4	61,2	1151,5	668,2	1153,8	485,6	2,371						2,09	11,8	1,069	1261	B+%5N
11				59,9	60,8	60,4	60,4	1150,4	675,3	1152	476,7	2,413						2,12	11,7	1,094	1280	
12	4,5	4,2		60,0	60,1	59,7	59,9	1147,9	673,3	1148,8	475,5	2,414						2,11	11,6	1,107	1284	
ORTALAMALAR																						
13	5,2	4,9	57,2	60,3	60	60,5	60,2	1149,4	671,9	1150,8	478,9	2,400						2,383	10	1,097	1097	B+%7N
14				59,9	59,4	59,6	59,6	1150,2	676,6	1151	474,4	2,425						2,58	10,8	1,116	1205	
15	4,5	4,2		60,0	59,8	60,1	60	1151,9	675,8	1152,8	477	2,415						2,46	10,9	1,106	1206	
ORTALAMALAR																						



Şekil 4.31. Stabilitenin Katkı Miktarı ile Değişimi

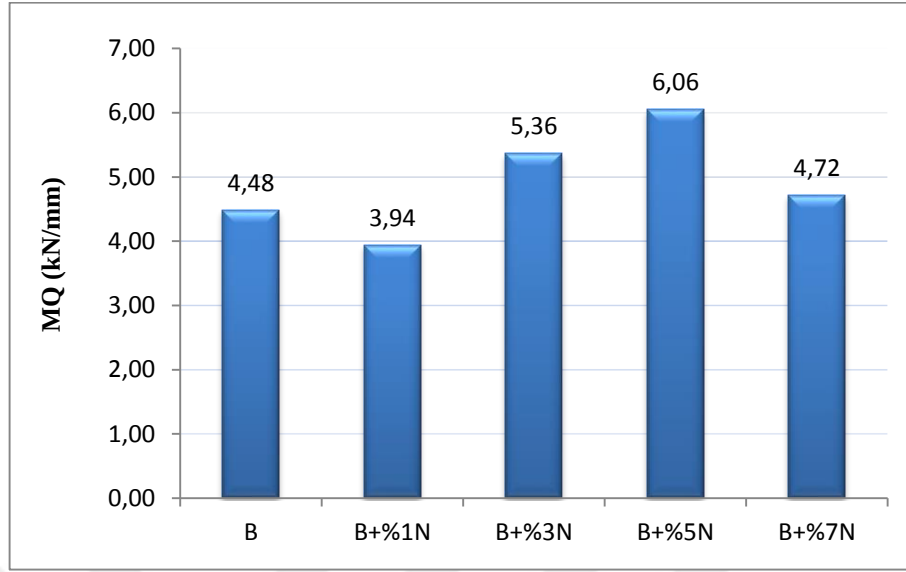
Şekil 4.31 incelendiğinde, nanosilika ilaveli modifiye bitüm kullanılarak hazırlanan karışımlarda, tüm karışımların stabilite değerlerinin genel olarak saf karışımdan yüksek olduğunu, modifiye karışımlardaki en yüksek stabilite değerine ise %5 nanosilika katkılı karışım numunesinde ulaşıldığını söylemek mümkündür. Nanosilika ilavesiyle stabilitenin artış göstermesi, kaplamanın tekerlek izi oluşumuna karşı dirençli olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.32. Karışımların Akma- katkı miktarı değişimi

Şekil 4.32 incelendiğinde karışımların akma değerleri, saf karışıma göre %1 nanosilika katkılı karışımda artma, %3 ve %5 nanosilika ilaveli karışımlarda azalma ve %7 nanosilika ilaveli karışımda diğer azalan değerlere göre artış göstermiştir.

Akma, kaplamanın trafik yükleri altındaki davranışını belirleyen, plastiklik ve esneklik özelliklerini belirleyen bir değerdir.



Şekil 4.33. Karışımların MQ- katkı miktarı değişimi

Şekil 4.33 incelendiğinde, karışımlardaki nanosilika yüzdesinin artmasıyla MQ değerlerine belirli önce azalma daha sonra artma gözlemlenmiştir. Saf bitüme göre bu değişim sırasıyla %12 azalma ve %19,64; %35; %5 artış şeklinde meydana gelmiştir. Saf ve nanosilika ilaveli karışımların MQ değerleri kıyaslandığında en yüksek MQ değerine %5 nanosilika katkılı karışımda ulaşıldığı görülmektedir ve bu orandaki modifiye karışımların deformasyonlara karşı çok daha dirençli olduğunu göstermektedir. Çünkü Marshall oranı, karışımın sertliğinin ve bitümlü sıcak karışımların deformasyona karşı direncinin bir göstergesidir.

4.8.2. Kalıcı Marshall Stabilitesi (RMS)

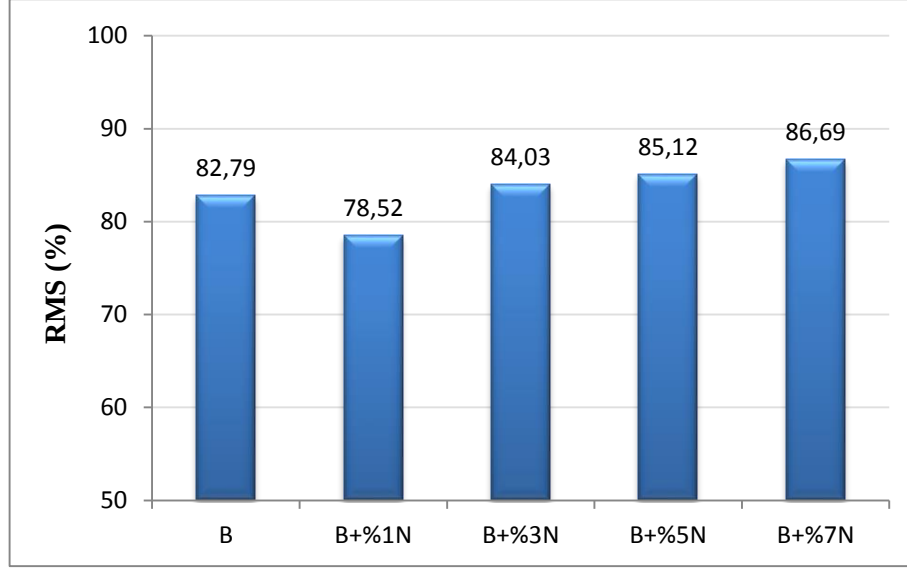
RMS değeri karışımların nem hasarına karşı direncinin göstergesi olarak kabul edilir. RMS değerinin belirlenmesi için numuneler 60°C suda 24 saat bekletilerek Marshall stabilite deneyine tabii tutulmuştur. 24 saat suda bekletilen numuneler “Koşullandırılmış”, 40 dakika bekletilen numuneler ise ‘koşullandırılmamış’ olarak adlandırılmıştır. RMS değeri, koşullandırılmış numunelerin stabilite değerlerinin koşullandırılmamış numunelerin stabilite değerlerine bölünmesiyle elde edilmiştir.

Karışımların RMS değerleri Çizelge 4.19’da verilmiştir. RMS değerinin katkı oranına göre değişimi de Şekil 4.34’te verilmiştir.

Çizelge 4.19. Karışımların RMS Değerleri

Karışım Türü	Koşullandırılmış Numunelerin Stabilitesi (kN)	Koşullandırılmamış Numunelerin Stabilitesi (kN)	RMS (%)
B	9,35	11,25	82,79
	9,76	11,86	
	9,51	11,46	
	Ortalama	Ortalama	
	9,54	11,52	
B+%1N	9,21	12,36	78,52
	9,38	11,84	
	9,78	11,93	
	Ortalama	Ortalama	
	9,46	12,04	
B+%3N	9,85	11,38	84,03
	9,64	11,85	
	9,98	11,84	
	Ortalama	Ortalama	
	9,82	11,69	
B+%5N	10,03	10,97	86,6876
	10,13	12,05	
	10,25	12,06	
	Ortalama	Ortalama	
	10,14	11,69	
B+%7N	10,55	12,61	85,12
	10,76	12,8	
	11,25	12,84	
	Ortalama	Ortalama	
	10,85	12,75	

Çizelge 4.19 ve Şekil 4.34 incelendiğinde, saf ve nanosilika ilaveli karışımların nem hasarına karşı dayanımlarının %80'in üzerinde olduğu görülmektedir.



Şekil 4.34. RMS değerinin Katkı Oranına Göre Değişimi

Bu sonuçlara göre saf bağlayıcıya göre RMS oranlarındaki değişim %4,7 azalma ve %1,24; %2,33; %3,9 artış şeklinde meydana gelmiştir. Bu durumda nanosilika ilavesiyle özellikle %5 oranında elde edilmiş modifiye bağlayıcılarla üretilmiş olan kaplamaların nem hasarına karşı ciddi direnç göstereceğini ifade etmek mümkündür.

4.8.3. Dolaylı Çekme Rijitlik Modülü (ITSM) Deneyi

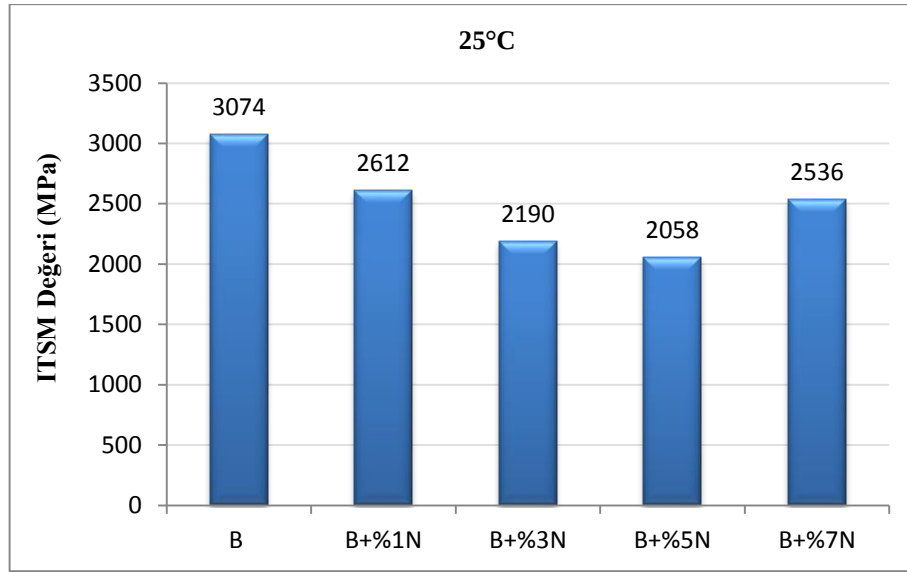
Saf ve nanosilika katkılı karışımlar üzerinde BS DD 213 standartına uygun olarak dolaylı çekme rijitlik modülü (ITSM) deneyi uygulanmıştır. Deneyde B160/220 saf bitüm numunelerinden ve %1, %3, %5 ve %7 nanosilika katkılı numunelerin her birinden üçer adet toplamda 15 adet numuneye ITSM deneyi uygulanmıştır. Deneyde numuneler üzerinde ilk olarak 5 adet ön yükleme, daha sonrada 5 defa deney yüklemesi yapılarak karışımların dinamik yükler karşısındaki rijitlikleri belirlenmiştir. Deneyde yük periyodu 3000 ms, yük artış süresi 124 ms, poisson oranı 0,35 hedef deformasyon ise 5 μ m olarak seçilmiştir. Cihazda yatay ekseninde 5 μ m deformasyon meydana getirecek yük otomatik olarak belirlenmiştir. Numuneye uygulanan 5 darbe sonucunda ITSM değerleri bilgisayarda verilir, elde değerlerin ortalamasından numunenin ITSM değeri belirlenmiştir.

25°C sıcaklıkta yapılan deney sonuçları Çizelge 4.20’de, ITSM değerinin katkı miktarı ile değişimi Şekil 4.35’te verilmiştir.

Çizelge 4.20. Karışımların ITSM Deney Sonuçları

Karışım Türü	No	25°C	
		Yükseklik (mm)	ITSM değeri (Mpa)
B	1	59,7	2986
	2	60,0	3080
	3	59,8	3156
	Ortalama	59,8	3074
B+%1N	1	59,7	2628
	2	60,0	2598
	3	59,8	2610
	Ortalama	59,8	2612
B+%3N	1	60,0	2186
	2	60,0	2192
	3	60,0	2191
	Ortalama	60,0	2190
B+%5N	1	59,9	1897
	2	60,3	2285
	3	60,0	1993
	Ortalama	60,1	2058
B+%7N	1	60,0	2889
	2	59,6	2111
	3	59,7	2608
	Ortalama	59,8	2536

Çizelge 4.20 ve Şekil 4.35 incelendiğinde, karışımlarda nanosilika ilavesinin (%1, %3, %5 ve %7) giderek artmasıyla saf bitümlü karışım numunelerine göre ITSM değerleri 25 °C sıcaklıkta azalma göstermiştir. En yüksek ITSM değeri %1 nanosilika katkılı karışımda görülmüştür. Buna göre; nanosilika katkılı karışımlarda, trafik etkisiyle kaplamada oluşan ve yorulma çatlaklarına sebep olan çekme ve basınç gerilmelerinin neden olduğu kalıcı deformasyonlara karşı direncinin saf bağlayıcıdan düşük değerlere sahip olduğu ve ciddi bir etki oluşturmadığı söylenebilir.



Şekil 4.35. Karışımların ITSM Değerinin Katkı Miktarı ile Değişimi

4.8.4. Dolaylı Çekme Mukavemeti (ITS) ve AASHTO T283 Sonuçları

ITS deneyi, AASHTO T283 standardına göre saf ve modifiye bitümlerin çekme oranının belirlenerek nem hasarına karşı dayanımlarının tespiti amacıyla yapılmıştır. B160/220 saf bitüm ve %1, %3, %5 ve %7 nanosilika katkı modifiye bitümler ile hazırlanan her bir karışım türü için 6 numune olmak üzere toplamda 18 numune hazırlanmıştır. Karışım numunelerinin üçer tanesine vakum uygulanarak boşluk oranlarının %70-%80'inin suyla doldurulması sağlanmıştır. Vakum uygulanan numuneler vakum cihazından çıkarıldığında hemen streç film ile sarılmış ve -18 °C sıcaklıktaki dondurucuda 16 saat bekletilmiştir.

Numunelere vakum çekilmesi Şekil 4.36 (a)'da, streç film ile sarılma işlemi Şekil 4.36 (b)'de gösterilmiştir.

Dondurucudan çıkarılan numuneler ardından 60 °C'deki su banyosunda 24 saat bekletilmiştir. Son aşama olarak numuneler 25 °C sıcaklıktaki su banyosunda 2 saat bekletildikten sonra Marshall stabilite cihazında kırılmıştır. Tüm bu işlemlerin uygulandığı numuneler 'koşullandırılmış' numuneler olarak adlandırılmıştır.



Şekil 4.36. Numunelere Vakum Uygulanması (a), Streç Film ile Sarılması (b)

60°C su banyosunda bekletilen numuneler Şekil 4.37(a)'da, numunelerin kırılması ise (b) de gösterilmiştir. 'Koşullandırılmamış' numuneler ise sadece 25°C sıcaklıktaki su banyosunda 2 saat bekletildikten sonra kırılmıştır. Kırma işlemi süresince numunelere 50,8 mm/dk'lık sabit yükleme hızı uygulanmıştır.



Şekil 4.37. Numunelerin 60°C Su Banyosunda Bekletilmesi (a) ve Kırılması (b)

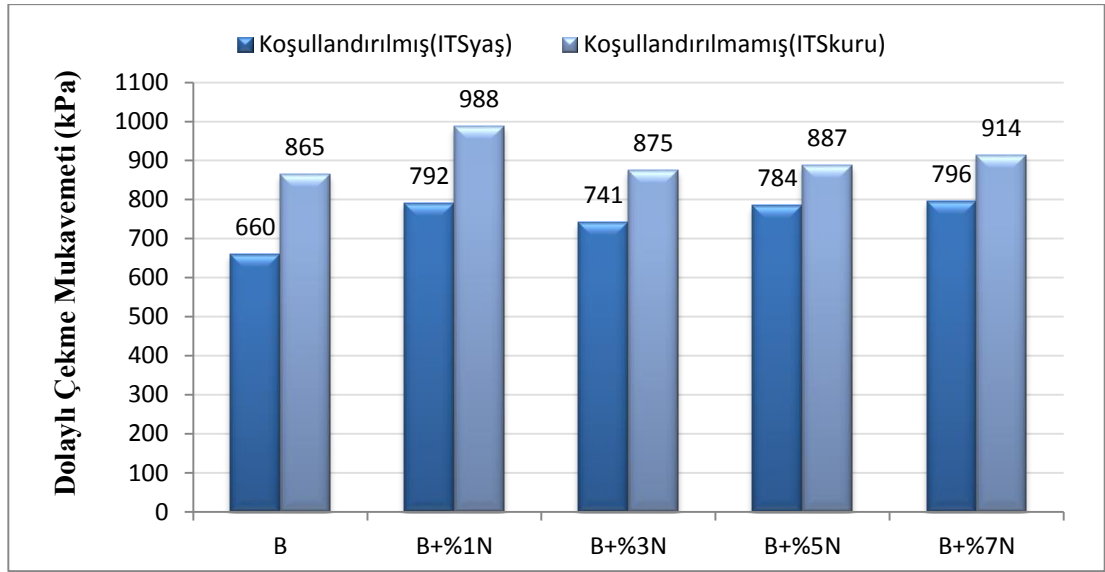
Çizelge 4.21'de ITS deneyine tabi tutulan koşullandırılmış numunelerin dolaylı çekme mukavemetleri $ITS_{yaş}$, koşullandırılmamış numunelerin dolaylı çekme mukavemetleri ITS_{kuru} olarak adlandırılmıştır. Nem hassasiyetinin bir ölçüsü olan dolaylı çekme mukavemeti oranı (ITSR) ise, $ITS_{yaş}$ değerinin ITS_{kuru} değerine oranlanmasıyla hesaplanmıştır. Tüm sonuçlar Çizelge 4.21'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.21. Karışımların ITS ve ITSR Değerleri

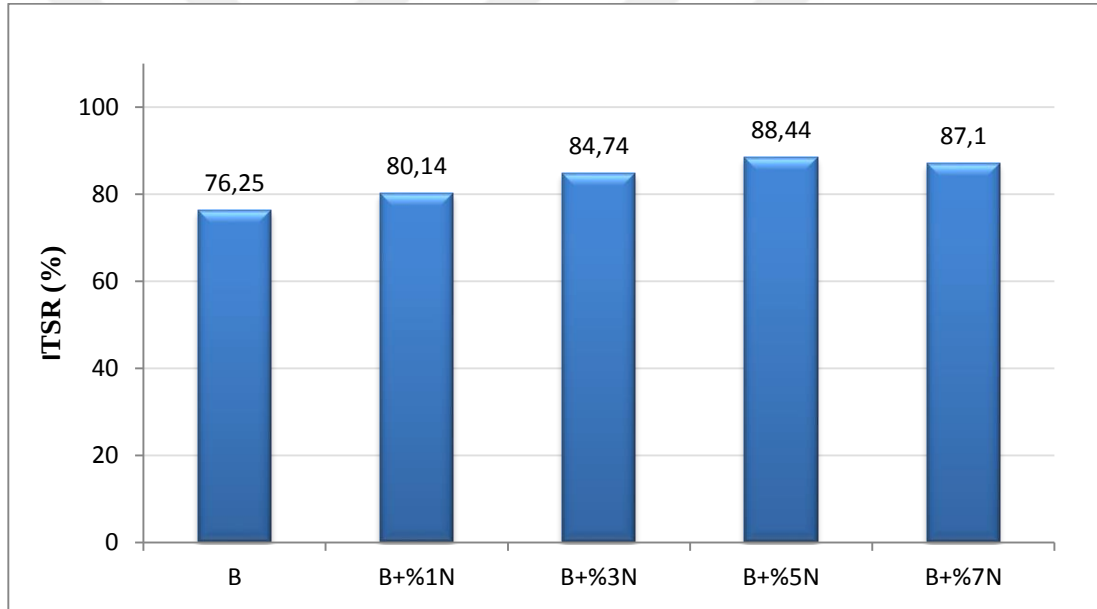
Karışım Türü	No	Koşullandırılmış Numuneler			Koşullandırılmamış Numuneler			ITSR (%)
		Yükseklik (mm)	P _{maks} (kN)	ITS yaş (kPa)	Yükseklik (mm)	P _{maks} (kN)	ITS _{kuru} (kPa)	
B	1	59,58	6,15	647,11	59,53	8,22	865,65	76,25
	2	60,09	6,3	657,27	60,24	8,26	859,61	
	3	59,94	6,45	674,61	59,73	8,29	870,10	
	Ortalama			659,66	865,12			
B+%1N	1	59,02	7,22	766,91	59,37	9,35	987,30	80,14
	2	59,97	7,55	789,26	59,73	9,36	982,40	
	3	58,85	7,69	819,19	59,89	9,5	994,43	
	Ortalama			791,79	988,05			
B+%3N	1	59,95	7,02	734,10	60,14	8,45	880,85	84,74
	2	60,22	7,17	746,42	60,26	8,38	871,81	
	3	60,4	7,16	743,16	59,43	8,26	871,33	
	Ortalama			741,23	874,66			
B+%5N	1	60,2	7,46	776,87	59,88	8,38	877,34	88,44
	2	60,62	7,5	775,63	60,08	8,65	902,59	
	3	59,88	7,65	800,91	60,48	8,5	881,08	
	Ortalama			784,47	887,00			
B+%7N	1	59,72	7,78	816,71	59,8	8,58	899,48	87,10
	2	60,35	7,88	818,57	60,07	8,78	916,31	
	3	60,37	7,25	752,88	59,91	8,85	926,08	
	Ortalama			796,05	913,96			

Koşullandırılmış ve koşullandırılmamış numunelerin ITS değerlerinin katkı oranı ile değişimi Şekil 4.38’de, ITSR değerlerinin katkı oranı ile değişimi Şekil 4.39’da gösterilmiştir.

Şekil 4.38 incelendiğinde karışımlarda nanosilika katkı oranının artmasıyla (%1, %3, %5 ve %7) saf bitümlü karışım numunelerine göre koşullandırılmış (ITS_{yaş}) karışım numunelerinin dolaylı çekme mukavemet değerleri saf bitüme göre sırasıyla %20; %12; %19 ve %21 artış göstermiştir. Koşullandırılmamış (ITS_{kuru}) karışım numunelerinin dolaylı çekme mukavemet değerleride saf bitüme göre %14; %1,10; %2,53 ve %5,64 artış göstermiştir.



Şekil 4.38. Karışımların ITS Değerlerinin Katkı Oranı ile Değişimi



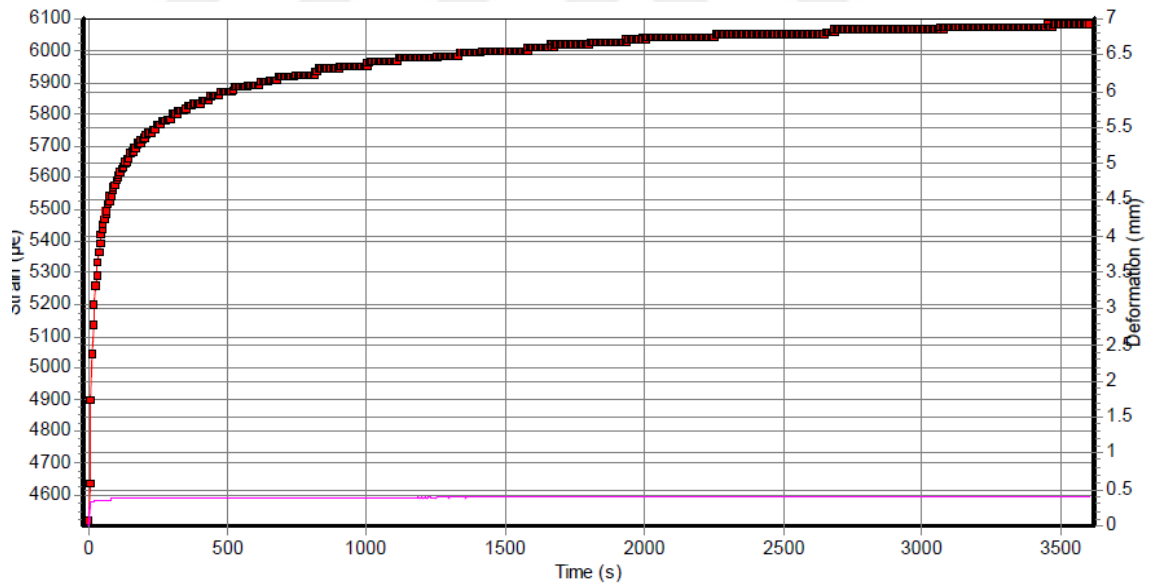
Şekil 4.39. Karışımların ITSR Değerlerinin Katkı Oranı ile Değişimi

Şekil 4.39 incelendiğinde, karışımlarda nanosilika katkı oranının artışıyla saf bitümlü karışım numunelerine göre karışım numunelerinin dolaylı çekme mukavemeti oranları (ITSR) değerleri %5,10; %11,13; %16 ve %14,22 olarak artış göstermiştir. En yüksek ITSR değeri %5 nanosilika ilaveli modifiye karışımlarda görülmüştür. Saf ve modifiye karışımlarda ITSR değerlerinin %70'in üzerinde olması, karışımların nem hasarına karşı direncinin yüksek olduğunu göstermektedir. Ayrıca nanosilikanın katkı olarak kullanımı ile hazırlanan modifiye karışımların sudan kaynaklanan bozulmalara karşı dirençlerinin yüksek olduğunu göstermektedir.

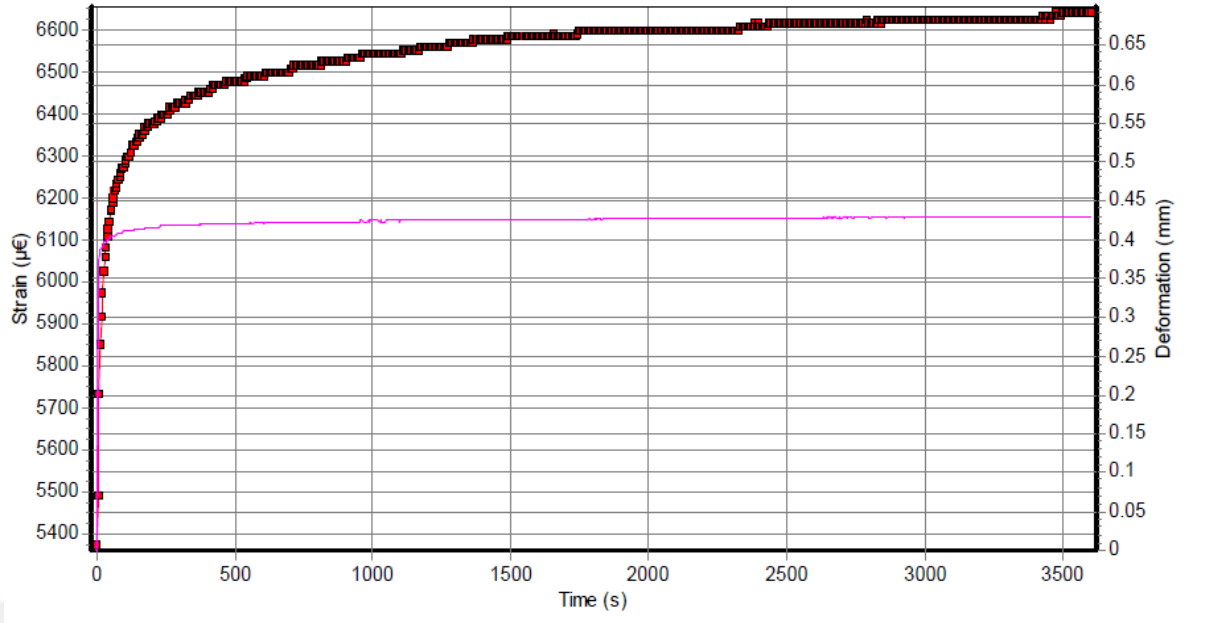
Tüm veriler değerlendirildiğinde genel olarak saf ve modifiye bağlayıcılar ve seçilen agrega dizayn yapısı ile hazırlanmış karışımların yeterli adezyon ve kohezyona sahip olduğu söylenebilir.

4.8.5. Statik Sünme Deneyi

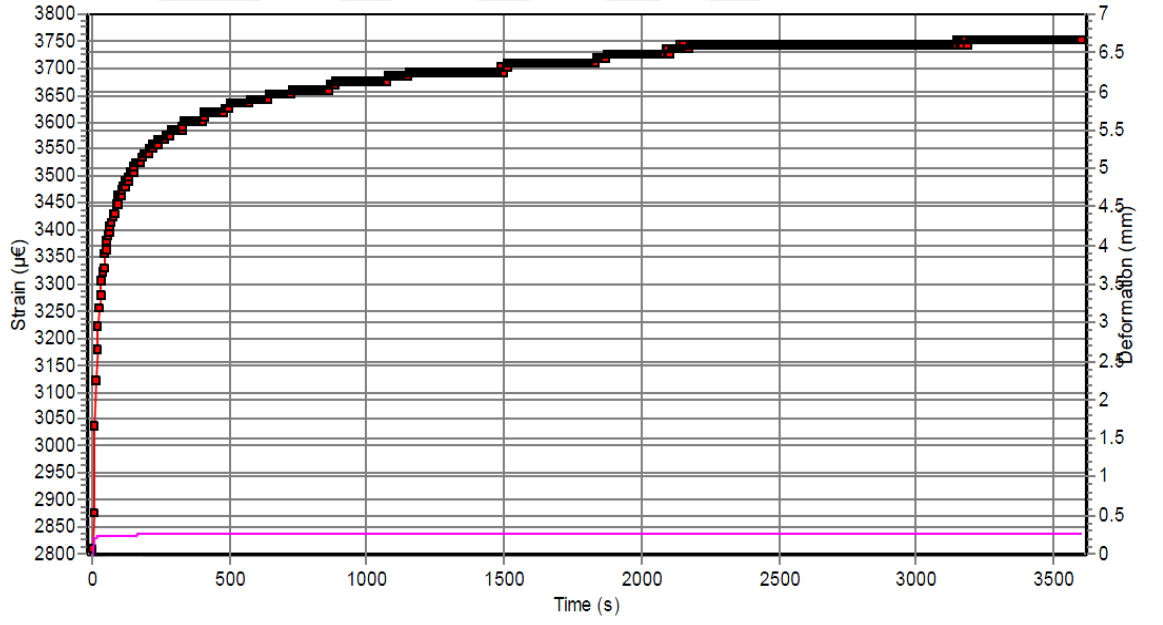
Saf ve nanosilika katkı ilaveli modifiye edilmiş karışımlar üzerinde uygulanan sünme deneyi 50°C sıcaklıkta gerçekleştirilmiştir. Deneye başlamadan önce karışım numuneleri 3 saat boyunca deney sıcaklığında bekletilerek koşullandırılmıştır. Cihaz, ilk önce numunede 10 dakika boyunca 20 kPa gerilme oluşturacak ön yükleme yapmıştır. Daha sonra sensörlerde meydana gelen değişim, bilgisayar tarafından otomatik olarak sıfırlanıp ve gerilme değeri 200 kPa'a çıkartılarak 60 dakikalık deney süresi başlatılmıştır. Deney süresi içerisinde bilgisayar yazılımı her 4 saniyede bir düşey deformasyonları kaydederek sünme sertliği değerini otomatik olarak hesaplamıştır. Numunelerin toplam birim şekil değiştirme-deformasyon-zaman sonuçları Şekil 4.40-4.44'de gösterilmiştir.



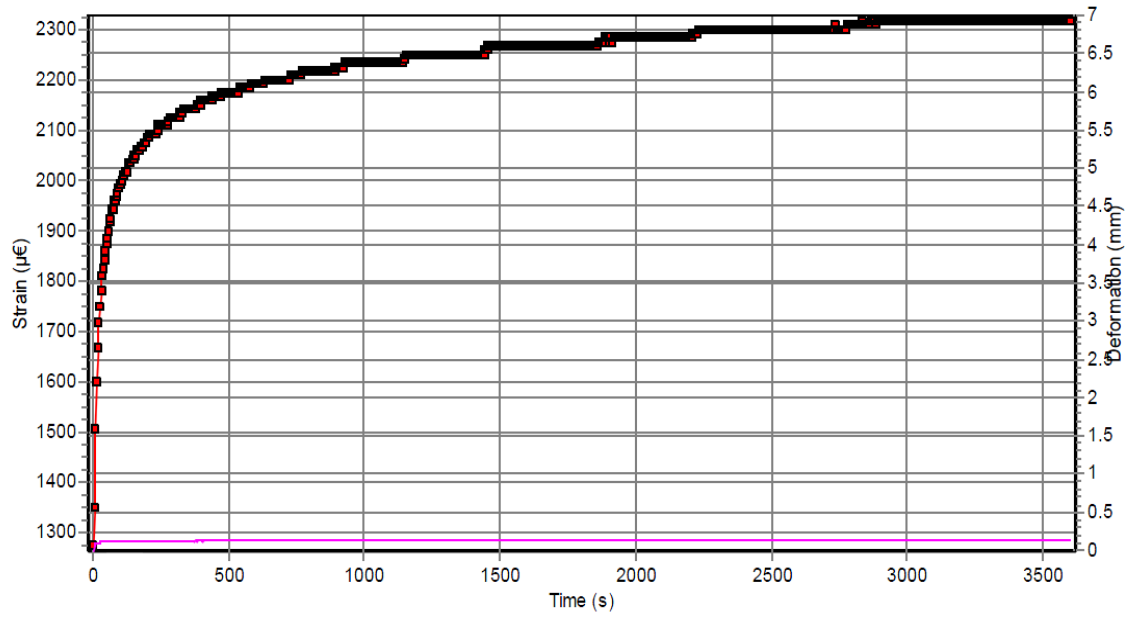
Şekil 4.40. Saf Karışım Numunesinin Toplam Birim Şekil Değiştirme-Deformasyon-Zaman Grafiği



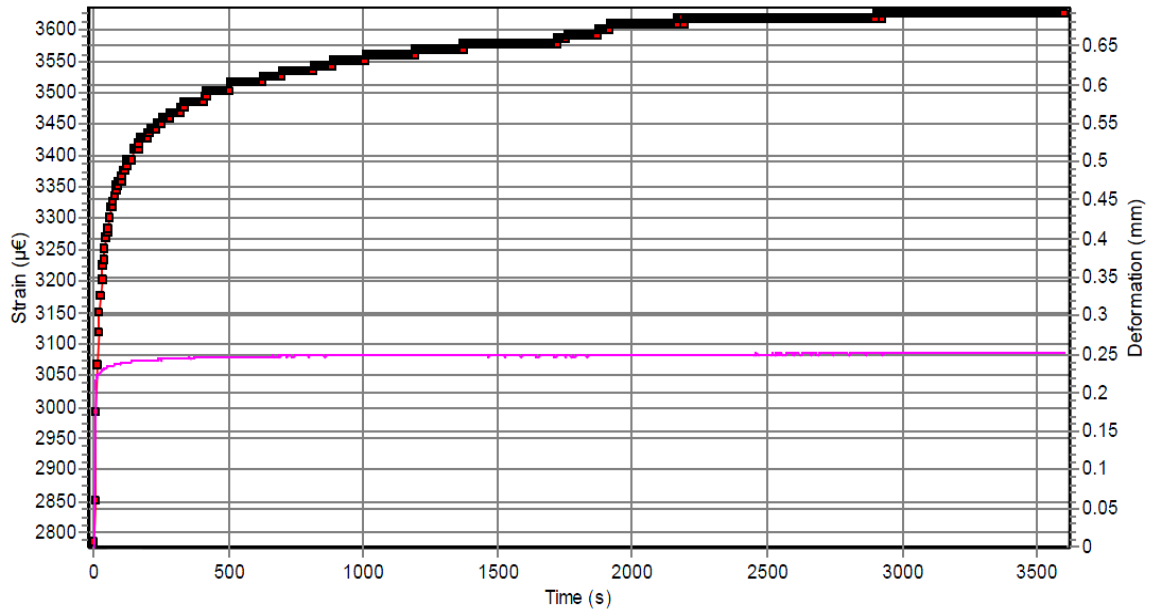
Şekil 4.41. B+%1N Karışım Numunesinin Toplam Birim Şekil Değiştirme-Deformasyon-Zaman Grafiği



Şekil 4.42. B+%3N Karışım Numunesinin Toplam Birim Şekil Değiştirme-Deformasyon-Zaman Grafiği

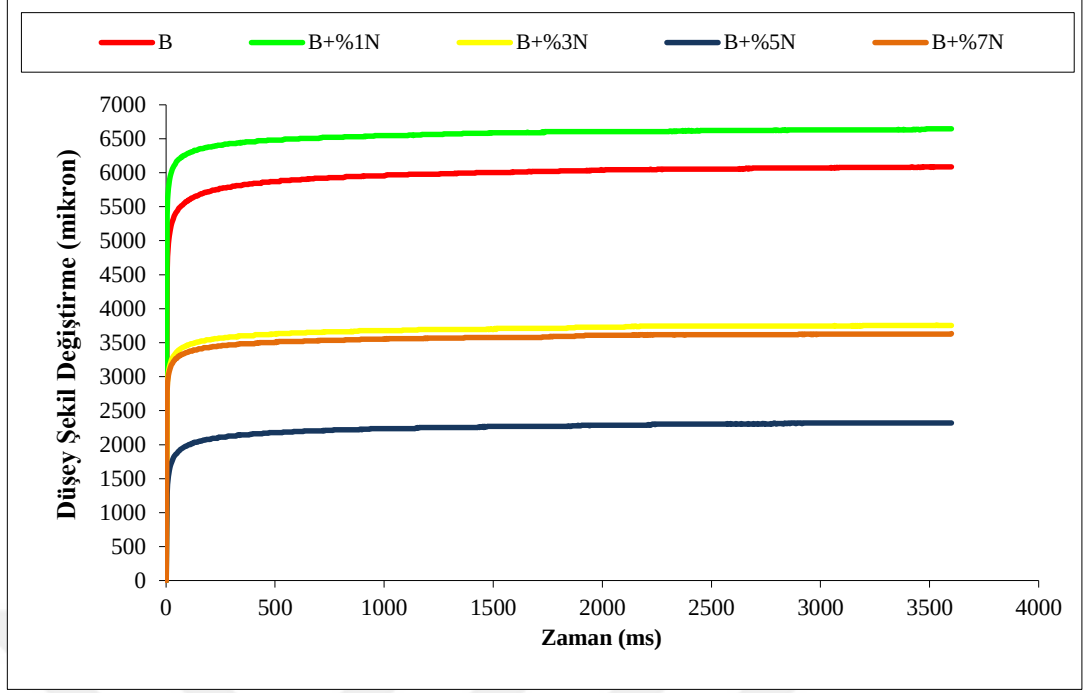


Şekil 4.43. B+%5N Karışım Numunesinin Toplam Birim Şekil Değiştirme-Deformasyon-Zaman Grafiği



Şekil 4.44. B+%7N Karışım Numunesinin Toplam Birim Şekil Değiştirme-Deformasyon-Zaman Grafiği

Saf ve modifiye bağlayıcılı karışım numunelerinin toplam birim şekil değiştirme-deformasyon-zaman grafikleri incelendiğinde nanosilika ilavesiyle, numunelerin daha az deformasyon yaptığı görülmektedir. Tüm numunelere ait toplam birim şekil değiştirme–zaman grafiği Şekil 4.45’de gösterilmiştir.



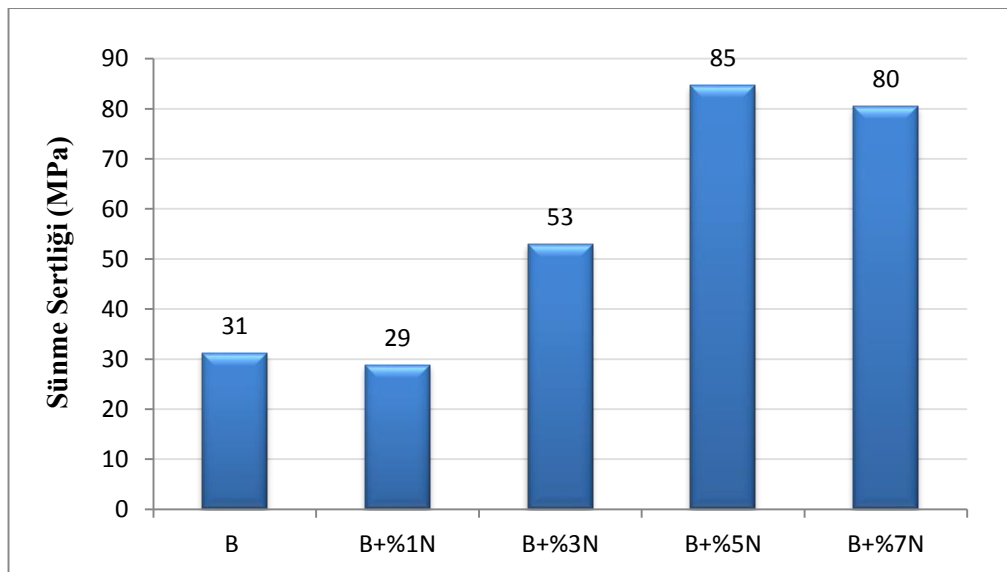
Şekil 4.45. Numunelerin Toplam Birim Şekil Değişirme- Zaman Grafiği

Şekil 4.45 incelediğinde nanosilika katkısıyla hazırlanan numunelerin, saf numuneye göre, toplam birim şekil değişirme değerlerinin azaldığı ve daha az deformasyon yaparak sünme özelliklerini gösterdiği görülmektedir.

Karışım numunelerinin sünme sertliği modülü (R_m) değerleri Çizelge 4.22’de verilmiştir. Numunelerin sünme değerlerinin katkı oranı ile değişimi Şekil 4.46’ da gösterilmiştir.

Çizelge 4.22. Numunelerin Sünme Sertliği Modülü (Rm) Değerleri

Karışım Türü	No	50°C	
		Yükseklik (mm)	Rm (Mpa)
B	1	59,9	27,42
	2	60	32,868
	3	59,8	33,217
	Ortalama	59,9	31,168
B+%1N	1	59,5	25,84
	2	59,9	30,102
	3	59,7	30,684
	Ortalama	59,7	28,875
B+%3N	1	60,1	53,305
	2	59,4	53,305
	3	60,2	52,48
	Ortalama	59,9	53,03
B+%5N	1	60,3	95,012
	2	59,6	82,884
	3	60	76,104
	Ortalama	60	84,667
B+%7N	1	60,3	80,281
	2	59,6	81,281
	3	60	79,872
	Ortalama	60	80,478



Şekil 4.46. Numunelerin Sünme Sertliği Modülü Değişimi

Şekil 4.46'daki grafik incelendiğinde nanosilika ilaveli modifiye bağlayıcı ile hazırlanan %3, %5, %7 oranlı karışımların, saf bağlayıcı ile hazırlanan ana karışıma göre, daha yüksek sünme sertliği değerine sahip olduğu ancak %1 oranında daha küçük olduğu görülmektedir. Nanosilika ilavesiyle karışım numunelerinin sünme sertliği değeri %1N katkılı numunede %7,34 azalma gösterirken, diğer karışımlarda sırasıyla %70; %170; %158 olarak artış göstermiştir. En yüksek sünme sertliği değerine %5 nanosilika ilaveli karışım numunesinde ulaşılmıştır. Katkı miktarının artışına paralel olarak, saf karışım numunesine göre nanosilika ilaveli karışımların sünme sertliği değerlerinin yüksek çıkması, karışımın tekerlek izi deformasyonuna karşı direncinin ciddi miktarda arttığını göstermektedir.



5. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında, katkı maddesi olarak kullanılan nanosilikanın bitüm ve bitümlü sıcak karışımların özelliklerine etkisi araştırılmış ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

1) Penetrasyon deney sonuçlarına göre; nanosilika katkılı modifiye bağlayıcıların penetrasyon değerleri %5 oranına kadar azalmış, sonrasında artma eğilimi göstermiştir. Bu azalma ile birlikte bağlayıcı sertleşerek B100/150 penetrasyon sınıfı bir bağlayıcıya dönüşmüştür.

2) Yumuşama noktası sonuçlarına göre; nanosilika katkı oranının artışıyla %5 oranına kadar bağlayıcıların sertliği artmış ancak sonrasında düşüş eğilimi göstermiştir.

3) Düktilite sonuçları; penetrasyon sonuçlarıyla paralellik göstermiştir. Sertleşen bağlayıcıların uzama yeteneğinde azalma görülmüştür.

4) Bu üç geleneksel deney sonuçları birbiriyle paralellik göstermiştir. Bu sonuçlara göre en kritik değer %5 nanosilika katkılı modifiye bağlayıcılardan elde edilmiştir.

5) Nanosilika katkılı bağlayıcıların sıcaklık hassasiyetleri saf bağlayıcıya göre çok fazla değişmemesine rağmen en uygun değer %5 nanosilika modifiyeli bitümlerde elde edilmiştir.

6) Kütle kaybı sonuçlarına göre nanosilikanın bağlayıcıların yüksek sıcaklık ve oksidasyon direnci üzerinde olumlu bir etkiye sahip olduğu görülmüştür.

7) DSR deney sonuçlarına göre, nanosilikanın bitümlerin yüksek sıcaklık performans özellikleri üzerinde kısmi artışlara rağmen çok önemli bir etkiye sahip olmadığı görülmüştür. Buna göre saf ve nanosilika modifiyeli bağlayıcıların yüksek sıcaklık performans sınıfı PG 58-Y olarak benzer bulunmuştur.

8) BBR deney sonuçlarına göre nanosilikanın bitümlerin düşük sıcaklık performans özellikleri üzerinde oldukça önemli olumlu bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Buna göre nanosilika ilavesiyle saf ve modifiye bağlayıcıların düşük sıcaklık performans sınıfları sırasıyla PG X-28, PG X-28, PG X-34, PG X-34, PG X-34 olarak tespit edilmiştir. Bu sonuçlara göre nanosilika ilavesiyle düşük sıcaklık performans sınıfının 1 derece (-6°C) azaldığı tespit edilmiştir.

9) Bağlayıcıların yüksek ve düşük sıcaklık performans sınıfları birlikte değerlendirildiğinde performans sınıfları sırasıyla PG 58-28, PG 58-28, PG 58-34, PG 58-34, PG 58-34 olarak belirlenmiştir.

10) RV sonuçlarına göre; saf bağlayıcıya göre nanosilika modifiyeli bitümlerin karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarının kısmen artmış olmasına rağmen bağlayıcı sınıfının değişmiş olması göz önüne alındığında daha sert olan bu bitüm için hemen hemen saf bitüme eşdeğer bulunmuştur. Bu sonuç modifiye bağlayıcılar için harcanacak enerjinin nispeten daha az olabileceğini ifade etmektedir.

11) Marshall test sonuçlarına göre en iyi stabilite sonucu %5 nanosilika modifiyeli karışımlardan elde edilmiştir. Bununla birlikte bütün karışımların akma değerleri yani yük altındaki davranışları birbirine yakın elde edilmiştir. Bitümlü karışımların sertliğinin ve deformasyona karşı direncinin bir göstergesi olan Marshall oranı (MQ) değeri en iyi %5 nanosilika ilaveli karışımlardan elde edilmiştir.

12) RMS sonuçlarına göre nanosilika artışıyla özellikle %5 oranındaki karışımın nem hasarına karşı direnci oldukça yüksek elde edilmiştir. Bu durum nanosilikanın karışımların kohezyonu üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir.

13) ITSM sonuçlarına göre nanosilika artışıyla karışımların esneklik modülü saf karışıma göre genel olarak azalmıştır. Bu durum kaplamanın daha elastik davranabileceğini göstermektedir.

14) ITSR sonuçlarına göre nanosilika ilavesiyle karışımların nem hasarı direncinin önemli derecede arttığı ve en kritik oranın %5 nanosilika modifiyeli karışımlarda olduğu görülmüştür. Bu nanosilikanın karışımların adezyon ve kohezyonu üzerinde olumlu bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir.

15) Sünme sonuçlarına göre nanosilikanın özellikle %5 oranında ilavesinin kaplamanın yüksek sıcaklıklardaki kalıcı deformasyonlara karşı direnci üzerinde çok önemli bir etkiye sahip olduğu (%170) görülmüştür.

Sonuç olarak; bitüm ve bitümlü sıcak karışımlarda nanosilika kullanımının (özellikle %5 oranında) bağlayıcıların özellikleri üzerinde olumlu bir etkiye sahip olduğu, özellikle düşük sıcaklık direncinin geliştiği, nanosilika ilaveli karışımlarda adezyon ve kohezyon yeteneğinin iyileştiği, stabilite ve sünme özelliklerinin arttığı tespit edilmiştir. Bu sebepten nanosilika ilavesiyle hizmet ömrü uzun ve kaliteli kaplamaların inşaa edilebileceği, bunun bir sonucu olarak bakım ve onarım masrafları bakımından kazançlar elde edilebileceğini ifade etmek mümkündür.

6. KAYNAKLAR

- [1] İskender, E., 2008. *Koşullandırma Sistemlerinin Geleneksel ve Modifiye Asfalt Karışımlar Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması*, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon
- [2] Aminbakhsh S., 2013. *Bitüm ve bitümlü karışımların özelliklerinin şeker pancarı melası kullanılarak geliştirilmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü,
- [3] Tunç, A., 2001. *Yol Malzemeleri ve Uygulamaları*, Atlas, İstanbul.
- [4] *Karayolları Teknik Şartnamesi*, 2013. K.G.M. Yayınları, Ankara
- [5] Tunç, A., 2004. *Esnek Kaplama Malzemeleri El Kitabı*, Asil Yayın Dağıtım.
- [6] Geçkil, T., 2008. *Siyah Karbonun Bitümlü Sıcak Karışımların Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi*, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [7] Umar, F. ve Açar, E., 1991. *Yol Üstyapısı*, İstanbul Teknik Üniversitesi Matbaası, İstanbul, 339s
- [8] Ilıcalı, M., Tayfur, S., Özen, H., Sönmez, İ. ve Eren, K., 2001. *Asfalt ve Uygulamaları*, İstanbul Büyükşehir Belediyesi İstanbul Asfalt Fabrikaları Sanayi ve Ticaret A.Ş., İstanbul, 37-46, 91-97
- [9] Balta, İ., 2004, *Bitümlü sıcak karışımların sudan kaynaklanan bozulmalara karşı duyarlılığı*, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir
- [10] Lavin, P.G., 2003, *Asphalt Pavements*, Spon Pres, London and New York, 444p.
- [11] *Asfalt ve Uygulamaları*, 2001. İSFALT Bilimsel Yayınları, No:1, İstanbul, 280 s
- [12] Anonim, 2002, *Asfalt El Kitabı*, İstanbul
- [13] *Shell Bitüm El Kitabı*, 2004, İstanbul Büyükşehir Belediyesi, İSFALT Bilimsel Yayın No:3, İstanbul, 334s.
- [14] Altaş, Ö.Y., 2002, *Bitümlü Malzemeler ve Karışım Şartnamelerinin Karşılaştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 150s.
- [15] Seloğlu, M., 2015, *Reaktif Terpolimerin Bitümlü Sıcak Karışım Üzerindeki Etkisinin Araştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya
- [16] Yelken, F., 2009. *Belen-Topboğazı (Hatay) Arası Yol Yapım Çalışmaları*, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- [17] Yılmaz, M., 2011. *Asfaltitin Bitümlü Sıcak Karışımların Mekanik Özellikleri Üzerindeki Etkisinin Araştırılması*, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.

- [18] Zaniewski, J.P. ve Pumphrey, M.E., 2004. *Evaluation of Performance Graded Asphalt Binder Equipment and Testing Protocol*, Asphalt Technology Program, p. 107, Morgantown, West Virginia.
- [19] Christensen, D.W., Anderson, D.A., 1992, Interpretation of Dynamic Mechanical Test Data for Paving Grade Asphalt Cements, **Proc. Assn. Asphalt Paving Technol.**, Vol. 61, pp 67–116.
- [20] Petersen, J.C., Robertson, R.E., Branthaver, J.F., Harnsberger, P.M., Duvall, J.J., Kim, S.S., Anderson, D.A., Christensen, D.W., Bahia, H.U., Dongre, R., Antle, C.E. ve Sharma, M.G., 1994. Binder Characterization and Evaluation Volume 4: Test Methods, **Strategic Highway Research Program**, SHRP A-370, 197 p., National Research Council Washington, DC.
- [21] Zoorob, S.E. ve 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**, 22, 233-242.
- [22] Yılmaz, M. ve Kök, B.V., 2008. Stiren-Butidien-Stiren Modifiyeli Bitümlü Bağlayıcıların Süperpave Sistemlerine Göre Yüksek Sıcaklık Performans Seviyesine ve İşlenebilirliğinin Belirlenmesi, **Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi**, 23(41), 811-819.
- [23] Ahmedzade, P., Alataş, T., Geçkil, T., 2007. Siyah Karbonun Asfalt Karışımların Mekanik Özellikleri Üzerindeki Etkisi, **Sigma Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi**, Cilt 25, Sayı 2, 179-189.
- [24] Asphalt Institute, 1996, *Mix design methods for asphalt concrete and other hot mix types*, Asphalt Institute, Manual Series No.2 (MS-2), Kentucky
- [25] Önal, M.A. ve Karamangil, M., 1993, *Bitümlü karışımlar laboratuvar el kitabı*, KGM Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı, Ankara
- [26] Kurtis, K., 2003, *Asphalt and asphalt concrete*, School of Civil Engineering, Georgia
- [27] Sağlık, A. ve Güngör, G.A., 2006, *Karayolları esnek üstyapılar projelendirme rehberi*, KGM Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı, Ankara
- [28] Özen, H., 2004, *Karayolları üstyapı ders notları*.
- [29] Kurtis, K., 2003, *Asphalt and asphalt concrete*, School of Civil Engineering, Georgia
- [30] Balta, İ., 2004, *Bitümlü Sıcak Karışımların Sudan Kaynaklanan Bozulmalara Karşı Duyarlılığı*, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 224s.
- [31] Torun, S., 2015, *Bitümlü Sıcak Karışımlarda Katkı Maddesi Olarak Pr Plast S Kullanımının Araştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya

- [32] Kırbaş, H., 1999, Asfalt kaplamalarda bozulma sebepleri ve oluşan yüzeysel soyulmalar ile çatlakların modern malzemelerle onarım yöntemleri, **Dumlupınar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları**, Kütahya, 3-5.
- [33] Kuloğlu, M., Kök, B.V. ve Öndaş, M., 2004, Sathi kaplamalarda kusma olayına etki eden faktörler, 4. Ulusal Asfalt Sempozyumu, Ankara, 141-148.
- [34] Bahia, H.U., Hanson, D.I., Zeng, M., Zhai, H., Khatri, M.A., Anderson, R.M., 2001, *Characterization of Modified Asphalt Binders in Superpave Mix Design*, NCHRP Report 459, National Academy Pres, Washington, DC, 53p.
- [35] Engin,Y., *Beton ve Nanoteknoloji*, <http://www.betonvecimento.com/beton-2/beton-ve-nanoteknoloji> ,Erişim 16.02.2015
- [36] Santagata E., Baglieri O., Tsantilis L.,Brignone I.,2015, “Effect of sonication on high temperature properties of bituminous binders reinforced with nano-additives”, **Construction And Building Materials**, 75, 395-403
- [37] Jahromi, S. G., and Khodaii, A. ,2009 , Effects on nanoclay on rheological properties of bitumen binder. **Constr. Build. Mater.** 23:2894–904
- [38] Shafabakhsh,G.H.,and Jafari Ani,O.(2015).Experimental investigation of effect of nanoTiO₂/SiO₂ modified bitumen on the rutting and fatigue performance of asphalt mixtures containing steel slag aggregates .**Constr.Build.Mater** 98:692– 702
- [39] Han, N. F., Zhou, D. J., and Tang, X. D. (2011). Effect of nano calcium carbonate and montmorillonite on properties of styrene-butadiene-styrene copolymer modified asphalt.**J.Appl.Mech.Mater.** 99:1035–1038
- [40] Yao, H., You, Z., Li, L., Lee, C. H., Wingard, D., Yap, Y. K., Shi, X., and Goh, S. W. (2013). Rheological properties and chemical bonding of asphalt modified with nanosilica. **J.Mater. CivilEng.** 25:1619–1630
- [41] Mohd Ezree Abdullah, Kemas Ahmad Zamhari, Nafarizal Nayan, Mohd Rosli Hainin, Madi Hermadi,(2012).Storage Stability and Physical Properties of Asphalt Modified with Nanoclay and Warm Asphalt Additives. **World Journal of Engineering** 9 (2):155-160
- [42] Ellie H. Fini, Ph.D., P.E., M.ASCE1; Pouria Hajikarimi2; Mohammad Rahi3; and Fereidoon Moghadas Nejad, Ph.D., P.E.4 ,(2016). *Physiochemical, Rheological, and Oxidative Aging Characteristics of Asphalt Binder in the Presence of Mesoporous Silica Nanoparticles*. **J. Mater. Civ. Eng.**, 2016, 28(2): 04015133
- [43] Hasan Taherkhani, Siamak Afroozi,(2016). The properties of nanosilica-modified asphalt cement. , **Petroleum Science and Technology**, 34: 15, 1381-1386, DOI: 10.1080/10916466.2016.1205604
- [44] Hui Yao, Ph.D.1; Zhanping You, Ph.D., P.E., M.ASCE2; Liang Li, Ph.D.3; Chee Huei Lee, Ph.D.4; David Wingard, Ph.D., M.ASCE5; Yoke Khin Yap6; Xianming Shi, Ph.D., P.E., M.ASCE7; and Shu Wei Goh, Ph.D.8.,2013, Rheological Properties and Chemical Bonding of Asphalt Modified with Nanosilica. **Journal of Materials in Civil Engineering** © ASCE

- [45] Saeed Ghaffarpour Jahromi, Ali Khodaii, 2009, Effects of nanoclay on rheological properties of bitumen binder. *Construction and Building Materials*-23
- [46] Nur Izzi Md. Yusoff, Aeyman Abozed Saleh Breem , Hani N.M. Alattug , Asmah Hamim , Juraidah Ahmad ,(2014) . The effects of moisture susceptibility and ageing conditions on nano-silica/polymer-modified asphalt mixtures **Construction and Building Materials** -72 .139–147
- [47] Mehmet Saltan, Serdal Terzi, Sebnem Karahancer,2017. Examination of hot mix asphalt and binder performance modified with nano silica. **Construction and Building Materials** -156 .976–98
- [48] Abdullah Abou Khadrah, Mohamed Elshrief, Marwa Sabry, 2015, The improvement of Asphalt materials by adding Nano silica. Proc. of the Third Intl. Conf. on Advances in Civil, **Structural and Construction Engineering** - CSCE ISBN: 978-1-63248-079-8: 10.15224/ 978-1-63248-079-8-59
- [49] Geçkil, T., 2019, Physical, Chemical, Microstructural and Rheological Properties of Reactive Terpolymer- Modified Bitumen, **Materials**, 12;6 ,921

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Eda TÜZÜN ÖZPINAR

Doğum Yeri ve Tarihi: Malatya - (01.01.1990)

Adres: İnönü Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü MALATYA

E-Posta: tuzun_eda@hotmail.com

Lisans: İnönü Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği, 2009– 2014

Yüksek Lisans: İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği
Ulaştırma Anabilim Dalı, 2015-2019

Mesleki Deneyimler:

-Milidya Yapı Denetim Kontrol Mühendisi(2014-2015)

-Alaca İnşaat Şantiye Şefi (2016-2018)