

DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BİTÜMLÜ BAĞLAYICI VE ASFALT
KARIŞIMLARININ NANO MALZEMELERLE
MODİFİKASYONU

Hameedullah RAUFI

Mayıs, 2018

İZMİR

**BİTÜMLÜ BAĞLAYICI VE ASFALT
KARIŞIMLARININ NANO MALZEMELERLE
MODİFİKASYONU**

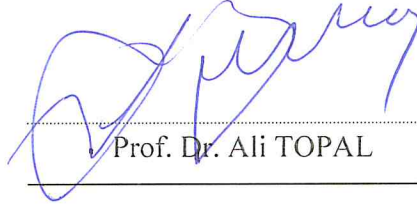
**Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Yüksek Lisans Tezi
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Ulaştırma Programı**

Hameedullah RAUFI

**Mayıs, 2018
İZMİR**

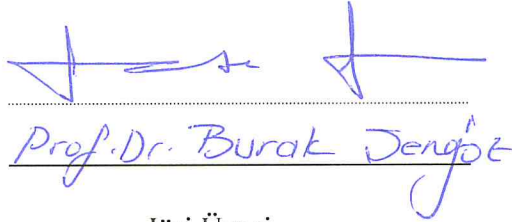
YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

HAMEEDULLAH RAUFI, tarafından PROF. DR. ALİ TOPAL yönetiminde hazırlanan “BİTÜMLÜ BAĞLAYICI VE ASFALT KARIŞIMLARININ NANO MALZEMELERLE MODİFİKASYONU” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.



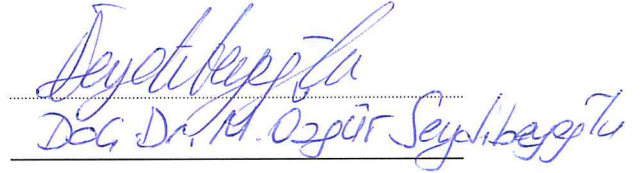
Prof. Dr. Ali TOPAL

Yönetici



Prof. Dr. Burak Dengez

Jüri Üyesi



Doç. Dr. M. Özgür Seyhanbeyoğlu

Jüri Üyesi



Prof. Dr. Latif SALUM

Prof. Dr. Latif SALUM

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

İlk olarak her zaman bana yol gösteren, bir sorunla karşılaştığımda ve çalışmalarım boyunca bir sorum olduğunda bana her anlamda içten yardımcı olan, sarsılmaz coşkusu ile beni daima büyüleyen ve çalışmalarımın her zaman heyecanla devam etmemi sağlayan, uzmanlık alanımda teknik anlamda bilgi ve tecrübesi ile çalışmalarımın nihayete ermesinde büyük katkısı olan, danışman hocam sayın Prof. Dr. Ali TOPAL'a derin şükranlarımı sunmak isterim.

Değerli tavsiyeleri sayesinde teknik olarak çalışmalarımın farklı boyutlar kazandıran sayın Prof. Dr. Burak ŞENGÖZ'e minnettar olduğumu ve sayın Prof. Dr. Serhan TANYEL'e kayıtsız şartsız destekleri için teşekkürlerimi sunduğumu bildirmek isterim.

Ayrıca, bu vesile ile Dokuz Eylül Üniversitesi Ulaştırma Anabilim Dalı'ndaki takdir ettiğim çalışma arkadaşlarıma teşekkür etmek isterim. Özellikle, sadece laboratuvarında deneylerimde bana yardımcı olmakla kalmamış, aynı zamanda Yüksek Lisans eğitimim boyunca derslerimde de teşvik edici öneriler ve destekleri ile bana yardımcı olan sayın Arş. Gör. Derya KAYA ve sayın Dr. Peyman Aghazadeh Dokandari'ye teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak, bana hayatımın her anında ve her anlamda desteklerini esirgemeyen aileme minnettar olduğumu beyan etmek isterim ve kendilerine Yüksek Lisans eğitimim boyunca çalışmalarımın koşulsuz destekleri ve bana olan sevgilerinden dolayı teşekkürlerimi sunarım. Bu yüksek lisans tezimi aileme ithaf etmek istiyorum.

Hameedullah RAUFI

BİTÜMLÜ BAĞLAYICI VE ASFALT KARIŞIMLARININ NANO MALZEMELERLE MODİFİKASYONU

ÖZ

Nanomalzemeler, nespetin daha yüksek aktif yüzey alanı ve kuantum etkileri yaratan küçük boyutları sahip çok benzersiz özelliklere gösteren malzemeler olduğu için araştırma alanında çok dikkat çekmiştir. Yaygın olarak ortaya çıkan sıkıntılara karşı asfalt kaplamaların genel performansını iyileştirme amacıyla bitüme nanomalzemelerin katması, özellikle son birkaç on yılda, çok araştırılmıştır.

Bu çalışma kapsamında, bitüm ağırlığınca yüzdesi olarak 2, 4 ve 6 nano-Bentonit, 3, 6 ve 9 nano-CaCO₃ ve 0,1, 0,2 ve 0,3 nano-organosilan olmak üzere üç tür nanomalzeme bitüme eklenmiştir. Nanomodifiye bitüm numunelerini hazırlamak için yüksek-hızlı bir karıştırıcı kullanılmıştır. Bitümlü fazda nanopartiküller ve nanoteknoloji temelli sıvı katkı maddesinin dağılımını gözlemlemek amacıyla floresan mikroskopisi kullanılmıştır. Bitümlü sıcak karışım (BSK) 'nın hazırlanması için kireçtaşı kullanılmıştır.

Bu çalışmanın amacı, bitümlü bağlayıcının fiziksel ve reolojik özelliklerine yönelik her üç tip nanomalzemenin bitüm içindeki etkisini değerlendirmek ve nanomalzemerle içerene bitüm örnekleri ile hazırlanan asfalt karışımlarının mekanik davranış ve performanslarını incelemektir. Bu amaçla saf ve nanomodifiye edilmiş bitüm üzerinde bazı geleneksel ve reolojik deneyler yapılmıştır. Optimum bitüm içeriğini belirlemek için Marshall stabilite ve akma deneyi, hem kontrol hem de nanomalzemeleri içerene asfalt karışımları üzerinde uygulanmıştır. Son olarak, asfalt karışımının neme karşı duyarlılığı belirtmek için modifiye Lottman deneyi (AASHTO T283) uygulanmış ve çekme direnme oranları (TSR) elde edilmiştir.

Elde edilen sonuçlara göre, nanomalzemelerin bitümün fiziksel özellikleri (penetrasyon, yumuşama noktası) üzerinde büyük etkisi olmadığını göstermiştir. Buna karşın, nanomalzemeler saf bitüm bağlayıcının yüksek sıcaklık performansını,

yaşlanma direncini, depolama kararlılığını ve reolojik özelliklerini geliştirmiştir. Genel olarak, nanomalzemelerli asfalt karışımlar kontrol karışımına göre daha düşük optimum bitüm içeriği değerleri vermiştir. Modifiye Lottman deneyi sonuçları, kontrol karışımları ile karşılaştırıldığında her üç katkı özellikle nano-organosilan'ın TSR değerlerinde artışa neden olduğunu bildirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Nanomalzemeler, nano-Bentonit, nano-CaCO₃, nano-organosilan, floresan mikroskopi, modifikasyon, BSK, neme karşı duyarlılık



MODIFICATION OF BITUMINOUS BINDERS AND ASPHALT MIXTURES BY USING NANO MATERIALS

ABSTRACT

Due to having unique features like the higher active surface area and small spatial dimensions that give rise to the quantum effects, nanomaterials have made a solid ground in the research area. The introduction of nanomaterials into bitumen for enhancement of pavement in terms of its overall performance against commonly occurring distresses has been the topic of research for the last few decades.

Within the scope of this study, three types of nanomaterials at their various proportions (percentage wise 2, 4 and 6 nano-Bentonite; 3, 6 and 9 nano-CaCO₃, and 0.1, 0.2 and 0.3 nano-organosilane) were added into bitumen. A high-speed shearing mixer was employed to prepare the nanomodified bitumen samples. Fluorescence microscopy was utilized to observe the dispersion of nanomaterials in bituminous phase. For the preparation of hot mix asphalt (HMA), limestone was used.

The objective of this study was to assess the influence of nanomaterials on physical and rheological properties of bitumen binders and also examine the mechanical behavior and performance of asphalt mixtures involving these nanomaterials. For this purpose, conventional and rheological tests were performed on base and nanomodified binders. For determining optimum bitumen contents, Marshall stability and flow test was carried out. Finally, the Modified Lottman test (AASHTO T283) was performed on compacted specimens to predict their performances against moisture susceptibility by obtaining the Tensile Strength Ratios (TSR).

Based on the obtained results, nanomaterials were not very influential on the physical properties (penetration, softening point) of bitumen. However, they enhanced the high-temperature performance, aging resistance, storage stability and rheological properties when compared to the base binder. With nanomodification, asphalt mixtures resulted in lower optimum binder contents. The Modified Lottman test results declared

that nanomaterials, especially nano-organosilane, can improve TSR values when compared with the control mixture.

Keywords: Nanomaterials, nano-Bentonite, nano-CaCO₃, nano-organosilane, fluorescent microscopy, modification, HMA, rheology, moisture-sensitivity



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZ	iv
ABSTRACT	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ	xii
TABLolar LİSTESİ	xv
BÖLÜM BİR – GİRİŞ	1
1.1 Tarihsel Gelişim	1
1.2 Kapsam	3
1.3 Amaç	3
1.4 Tez İçeriği	4
BÖLÜM İKİ - NANOMALZEMELER VE NANOTEKNOLOJİ.....	6
2.1 Nanomalzemeler ve Nanaoteknolojiye Giriş	6
2.2 Nanomalzemelerin Başlıca Özellikleri.....	8
2.3 Nanomalzemelerin Sentezlenmesi ve İşlenmesi	9
2.4 Nanomalzemelerin Yapısal Olarak Sınıflandırılması	10
2.5 Nanomalzemelerin Karakterizasyonu	11
2.6 Nanomalzeme Uygulamaları	12
BÖLÜM ÜÇ - ASFALT ENDÜSTRİSİNDE NANO MALZEMELER.....	13
3.1 Giriş	13
3.2 Bitümlü Malzemelerin Nanomalzemelerle Modifikasyonu	17
3.2.1 Kuru Karıştırma Yöntemi (Yüksek Hızlı Kesme Mikseri Kullanarak)...	18
3.2.2 Çözücüde Eritme Yöntemi	18

3.3 Nanomodifiye Bitümlü Bağlayıcıların Karakterizasyonu	20
3.4 Asfalt Modifikasyonunda Genel Olarak Kullanılan Nanomalzemeler	20
3.4.1 Nanokil	21
3.4.2 Nano-Kalsiyum Karbonat (Nano-CaCO ₃).....	26
3.4.3 Nano-organosilan (Nanoteknoloji Esaslı Soyulma Önleyici Kimyasal Katkı)	29
3.5 Asfalt Modifikasyonunda Kullanılan Diğer Nanomalzemeler.....	32
3.5.1 Nano-Sönmüş Kireç.....	32
3.5.2 Karbon Nanotüpler	33
3.5.3 Nanosilika (Nano-SiO ₂).....	34
3.6 Asfalt Kaplamalarda Nanomalzeme ve Nanoteknoloji Uygulamalarının Sakıncaları	35
BÖLÜM DÖRT - MALZEME VE YÖNTEM	37
4.1 Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Malzemeler	37
4.1.1 Bitümlü Bağlayıcı.....	37
4.1.2 Agregalar	37
4.1.3 Nano-Boyutlu malzemeler.....	39
4.1.3.1 Nano-Bentonit Kili.....	40
4.1.3.2 Nano Kalsiyum Karbonat (Nano-CaCO ₃)	42
4.1.3.3 Nano-organosilan Soyulma Önleyici Nanoteknoloji Katkısı	43
4.2 Deneysel Çalışmalar	45
4.2.1 Modifiye Bitüm Üretimi	45
4.2.1.1 Nano-Bentonit Katkılı Modifiye Bitüm Üretimi	46
4.2.1.2 Nano-CaCO ₃ Katkılı Modifiye Bitüm Üretimi.....	47
4.2.1.3 Nano-organosilan Katkılı Modifiye Bitüm Üretimi	47
4.2.2 Nanomalzemelerle Modifiye Edilmiş Bitümlü Bağlayıcılarda Mikroskopi Çalışmaları.....	49
4.2.3 Bitümlü Bağlayıcı Deneyleri	49
4.2.3.1 Penetrasyon Deneyi (ASTM D5, AASHTO T49).....	50
4.2.3.2 Yumuşama Noktası Deneyi (ASTM D 36, AASHTO T 53).....	51

4.2.3.3 Brookfield Dönel Viskozite Deneyi (ASTM D4402, AASHTO T 316)	53
4.2.3.4 Karıştırma ve Sıkıştırma Sıcaklıklarının Belirlenmesi	54
4.2.3.5 Depolama Stabilitesi Deneyi (TS EN 13399)	55
4.2.3.6 Dönel İnce Film Halinde Isıtma Deneyi (ASTM D2872, ASHTO T240)	56
4.2.3.7 Dinamik Kayma Reometresi (DSR) Deneyleri (ASTM D7175, AASHTO T 315)	57
4.2.4 Asfalt Karışım Deneyleri	61
4.2.4.1 Marshall Karışım Tasarımı (ASTM D 1559, AASHTO T 245)	61
4.2.4.2 İndirekt Çekme Mukavemeti (ITS) Deneyi (ASTM D 6931)	66
4.2.4.3 Modifiye Lottman Deneyi (AASHTO T 283-07)	69
BÖLÜM BEŞ - DENEYSEL ÇALIŞMALAR	72
5.1 Bitüm Deneyleri	72
5.1.1 Floresan Mikroskobu ile Nanomodifiye Bitümlerin Karakterizasyonu	72
5.1.2 Geleneksel Bitüm Deneylerinin Sonuçları	78
5.1.2.1 Penetrasyon ve Yumuşama Noktası Deney Sonuçları	80
5.1.2.2 Depolama Stabilitesi Deney Sonuçları (Geleneksel Yumuşama Noktası deneyi ile)	85
5.1.2.3 Brookfield Viskozite Deney Sonuçları	85
5.1.2.4 Karıştırma ve Sıkıştırma Sıcaklığının Belirlenmesi	87
5.1.3 Reolojik Deneylerinin Sonuçları	90
5.1.3.1 PG Ortalama Üst Kritik Sıcaklığı (T_{kritik})	90
5.1.3.2 Farklı Frekans ve Sıcaklıklarda Bitümün Reolojik Karakterizasyonu	92
5.2 Asfalt Karışımları Üzerinde Uygulanan Deneylerin Sonuçları	98
5.2.1 Marshall Karışım Tasarımı Sonuçları ve Optimum Bitüm İçeriklerin Belirlenmesi	99
5.2.2 Modifiye Lottman Deneyi Sonuçları (AASHTO T 283-07)	106

BÖLÜM ALTI - SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	112
6.1 Sonuçlar.....	112
6.1.1 Geleneksel Deneylerden Elde Edilen Sonuçlar	112
6.1.2 Reolojik Deneylerden Elde Edilen Sonuçlar	113
6.1.3 Marshall Deneyinden Elde Edilen Sonuçlar.....	114
6.1.4 Performans Deneylerin Sonuçları (AASHTO T 283)	115
6.2 Genel Sonuçlar	116
6.3 Gelecekteki Araştırmalar için Öneriler	117
KAYNAKLAR	118
EKLER.....	136
EK 1 : Marshall Karışım Tasarımı	136
EK 2 : İndirekt Çekme Muhavemeti (ITS) Deneyi ve Çekme Dayanım Oranı (TSR%).....	157

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 Büyük ölçekli nesnelere karbon nanotüp boyut karşılaştırmasının gösterimi	7
Şekil 2.2 Nano boyutlu malzemelerin artan yüzey alanının etkisinin illüstrasyonu	9
Şekil 2.3 Nano ölçekli malzemelerin sentezinde yukarıdan aşağıya ve aşağıdan yukarıya yaklaşımların gösterimi.....	10
Şekil 2.4 Nanomalzemelerin farklı yapısal biçimleri.....	11
Şekil 3.1 Çeşitli boyutlarda asfaltın değişimini gösteren illüstrasyon	15
Şekil 3.2 Asfalt kaplamalarda nanoteknolojinin bir araya getirilmesiyle iyileştirilmek üzere odaklanılacak bölgeleri tespit eden illüstrasyon	16
Şekil 3.3 MMT nanokilin kimyasal yapısının şematik görünümü.....	22
Şekil 3.4 OMMT modifiye bitümün yaşlanmayı geçtiren mekanizma	24
Şekil 3.5 Farklı polimerik mikro ve nanokompozit desenlerin illüstrasyon	25
Şekil 3.6 Nano-organosilan ilavesinden önce hidrofilik agrega yüzeyi (su seven) ...	29
Şekil 3.7 Agrega yüzeyini su itici hale dönüştüren nano-organosilan'ın kimyasal reaksiyonu.....	29
Şekil 3.8 Grafen levha ve karbon nanotübün şeması	33
Şekil 4.1 Nano-Bentonit.....	41
Şekil 4.2 Nano-CaCO ₃	43
Şekil 4.3 Nano-organosilan soyulma önleyici katkı	44
Şekil 4.4 Yüksek hızlı kesme mikseri	46
Şekil 4.5 a) Şeffaf nano-organosilan çözeltisi, b) Bitüme nano-organosilan'ın eklenmesi	48
Şekil 4.6 Olympus BX43 floresan mikroskobu	49
Şekil 4.7 Bitümlü bağlayıcılara uygulanan deneylere ait akış şeması	50
Şekil 4.8 Penetrasyon deney aleti	51
Şekil 4.9 Yumuşama noktası örneği (pirinç halkaya yerleştirilerek üzere çelik bilye konulmuş).....	52
Şekil 4.10 Yumuşama noktası deneyi cihazı.....	52
Şekil 4.11 Dönel viskozite deney cihazı ve numune kapları	54
Şekil 4.12 Bitümlü bağlayıcılar için viskozite-sıcaklık eğrisi	55

Şekil 4.13 a) Depolama stabilitesi deneyi için silindirik numune kabı, b) Numune etüvün içinde	56
Şekil 4.14 a) RTFOT cihazı, b) Numune doldurulmuş şişeler.....	57
Şekil 4.15 Dinamik Kayma Reometresi (DSR)	58
Şekil 4.16 Dinamik kayma reometresi (DSR) numune kalıpları	58
Şekil 4.17 Faz açısı eğrisi değişiklik.....	59
Şekil 4.18 DSR çalışma prensibi ve sonucunda oluşan eğri	60
Şekil 4.19 Bitümlü karışımlar üzere uygulanan prosedürler için akış şeması	61
Şekil 4.20 Marshall stabilite deney cihazı.....	63
Şekil 4.21 Bitüm ve agregayı karıştırmak için kullanılan karıştırıcı	63
Şekil 4.22 Marshall kompaktör	64
Şekil 4.23 Marshall tasarım yöntemine göre hazırlanmış asfalt numuneleri	65
Şekil 4.24 İndirekt Çekme Mukavemeti- illüstrasyon	67
Şekil 4.25 Sıkıştırılmış numunenin indirekt çekme dayanımı ölçümü için cihaza yerleştirilmesi	68
Şekil 5.1 %2 Nano-Bentonit modifiye bitüm numunenin fluoresan mikrografı.....	73
Şekil 5.2 %4 Nano-Bentonit modifiye bitüm numunenin fluoresan mikrografı.....	73
Şekil 5.3 %6 Nano-Bentonit modifiye bitüm numunenin fluoresan mikrografı.....	74
Şekil 5.4 %3 Nano-CaCO ₃ modifiye bitüm numunenin fluoresan mikrografı	74
Şekil 5.5 %6 Nano-CaCO ₃ modifiye bitüm numunenin fluoresan mikrografı	75
Şekil 5.6 %9 Nano-CaCO ₃ modifiye bitüm numunenin fluoresan mikrografı	75
Şekil 5.7 %0,1 Nano-organosilan modifiye bitüm numunenin fluoresan mikrografı	76
Şekil 5.8 %0,1 Nano-organosilan modifiye bitüm numunenin fluoresan mikrografı	77
Şekil 5.9 %0,1 Nano-organosilan modifiye bitüm numunenin fluoresan mikrografı	77
Şekil 5.10 Orijinal ve RTFOT-yaşlanmış nano-Bentonit modifiye bitümlü bağlayıcıların penetrasyon deney sonuçları ve penetrasyon indeksi değerleri	82
Şekil 5.11 Orijinal ve RTFOT-yaşlanmış nano-CaCO ₃ modifiye bitümlü bağlayıcıların penetrasyon deney sonuçları ve penetrasyon indeksi değerleri.....	82
Şekil 5.12 Orijinal ve RTFOT-yaşlanmış nano-organosilan modifiye bitümlü bağlayıcıların penetrasyon deney sonuçları ve penetrasyon indeksi değerleri	83

Şekil 5.13 Saf ve nanomodifiye orijinal ve yaşlanmış bitümlü bağlayıcılarda için yumuşama noktası deney sonuçları	84
Şekil 5.14 Saf ve nanomodifiye bitümlü bağlayıcılar için dönel viskozite deney sonuçları	86
Şekil 5.15 Saf bitüm için viskozite-sıcaklık grafiği	88
Şekil 5.16 Nano-Bentonit modifiye bitümlü bağlayıcılarda viskozite-sıcaklık grafiği	88
Şekil 5.17 Nano-CaCO ₃ modifiye bitümlü bağlayıcılarda viskozite-sıcaklık grafiği	89
Şekil 5.18 Nano-organosilan modifiye bitümlü bağlayıcılarda viskozite-sıcaklık grafiği	89
Şekil 5.19 0,01 Hz'deki yaşlandırılmamış, saf ve nanomodifiye numuneler için G*/sinδ değerleri	94
Şekil 5.20 10 Hz'deki yaşlandırılmamış, saf ve nanomodifiye numuneler için G*/sinδ değerleri	95
Şekil 5.21 0,01 Hz'deki RTFOT-yaşlı, saf ve nanomodifiye numuneler için G*/sinδ değerleri	97
Şekil 5.22 10 Hz'deki RTFOT-yaşlı, saf ve nanomodifiye numuneler için G*/ sinδ değerleri	97
Şekil 5.23 Nano-Bentonit modifiye asfalt karışımları için % 4 hava boşluğuna karşılık gelen optimum bitüm içeriğinin belirlenmesi.....	100
Şekil 5.24 Nano-CaCO ₃ modifiye asfalt karışımları için % 4 hava boşluğuna karşı gelen optimum bitüm içeriğinin belirlenmesi.....	101
Şekil 5.25 Nano-organosilan modifiye asfalt karışımları için 4 hava boşluğuna karşılık gelen optimum bitüm içeriğinin belirlenmesi.....	101

TABLULAR LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 4.1 50/70 penetrasyon sınıflı saf bitümün özellikleri	38
Tablo 4.2 Kireçtaşının fiziksel özellikleri	39
Tablo 4.3 Kireçtaşı agreganın gradasyonu (Aşınma Tip-1).....	39
Tablo 4.4 Nano-Bentonitin kimyasal analizi (%)	41
Tablo 4.5 Nano-Bentonitin fiziksel özellikleri	41
Tablo 4.6 Nano-CaCO ₃ 'ın genel özellikleri.....	42
Tablo 4.7 Nano-organosilan'ın fiziksel ve kimyasal özellikleri.....	44
Tablo 4.8 Nanomalzemeleri içeren bitüm numunelerin üretim koşulları	48
Tablo 4.9 PG sınıfı asfalt bağlayıcılar için DSR şartname kriterleri	60
Tablo 4.10 BSK Tip-1 aşınma tabakası için Marshall tasarım kriterleri	66
Tablo 5.1 Saf ve nano modifiye bitüm numunelerinin geleneksel deney sonuçları ..	79
Tablo 5.2 Saf ve nanomodifiye bitümlü BSK'nın karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkların aralıkları.....	87
Tablo 5.3 Saf ve nanomodifiye bitümlü bağlayıcılarda PG üst kritik sıcaklık sınıflarının saptanması.....	91
Tablo 5.4 Yaşlandırılmamış bağlayıcılar için farklı frekans ve sıcaklıklardaki reolojik deney sonuçları	93
Tablo 5.5 Yaşlandırılmış bağlayıcılar için farklı frekanslar ve sıcaklıklardaki reolojik deney sonuçları.....	96
Tablo 5.6 % 4 hava boşluğuna karşılık gelen Marshall mekanik ve hacimsel özellikleri	102
Tablo 5.7 Optimum bitüm içeriğinde hazırlanan kuru ve şartlandırılmış asfalt numunelerinin ITS ve TSR değerleri.....	107

BÖLÜM BİR

GİRİŞ

1.1 Tarihsel Gelişim

Esnek kaplamalar, neredeyse dünyanın her yerinde yol üstyapılarının önemli bir bölümünü oluşturmaktadır. Esnek kaplamaların rijit kaplamalar yerine tercih edilmesi, geri dönüşümlü, esnek, karşılaştırmalı olarak daha düşük maliyetle inşa edilebilir ve trafik için yumuşak ve konforlu bir sürüşü kolaylaştıran sebeplere dayanmaktadır.

Esnek kaplamalar genelde asfalt bağlayıcı, agrega ve filler gibi temel bileşenlerden oluşan bitümlü sıcak karışım (BSK) ile yapılır. Asfalt bağlayıcısı, esas itibariyle, agrega parçacıklarını birbiri ile yapıştınlması ve böylece kuvvetli ve esnek bir kütle oluşturduğu karışımdaki bağlayıcı bileşen olarak işlev görür.

Her mühendislik yapısının belirli bir hizmet ömrü vardır ve servis süresi sonunda bozulmaya başlayacaktır. Diğer birçok mühendislik alanında olduğu gibi havaalanı pistleri ve karayolu kaplamalarının tasarım ömrü için tatmin edici performansın sağlanması çabası, mühendisler ve araştırmacılar için büyük bir çalışma alanıdır. Bir kaplama yapısı erken bozulmaya başlarsa, bunun sonuçları geridönülemez olur ve bakım ya da yeniden yapımı zorunlu kılar. Aynı zamanda bakım ve yeniden yapım faaliyetleri toplum açısından büyük bir ekonomik kayba neden olur.

Daha ağır dingil yükleri ve çevresel koşullardaki değişimle birlikte giderek artan taşıt trafiği, asfalt kaplamalar için temel bozulma faktörleri olarak kabul edilmektedir. Asfalt karışımlarında birçok açıdan bitümlü bağlayıcının önemli bir rolü olduğu göz önüne alındığında, çok iyi seçilmesi gerektiği bir gerçektir.

Bitüm, sıcaklık değişimlerinin yanı sıra yüklemdeki değişimlere karşı da oldukça duyarlıdır. Bu etkiler sonunda tekerlek izleri, yorulma çatlakları, düşük sıcaklık çatlakları ve neme karşı duyarlılık nedeniyle oluşan soyulma gibi çeşitli bozulmalara yol açacaktır. Kaplama tabakalarında bu bozulmaların ortaya çıkması ile birlikte, kaplama istenilen performans seviyesinde hizmet veremezdir.

Modifiye edilmemiş saf bitüm ile yapılan kaplamalar olumsuz trafik ve çevre koşullarına karşı koyamayabilir. Bu, araştırmacılara ve yol imalatçılara bitümlü bağlayıcının mekanik ve reolojik özelliklerini geliştirmek için güvenilir ve ekonomik bir alternatif aramak için ilham kaynağı olmuştur. Bitümlü bağlayıcı özelliklerinin, olumsuz koşullara dayanacak şekilde güçlendirebilmek amacı ile çeşitli katkılar ilave edilerek modifiye edilmesi kaçınılmaz bir seçenek olarak ortaya çıkmıştır.

Bitümlü bağlayıcının modifikasyonu genellikle yapışkanlık, sıcaklık duyarlılığı, içsel kenetlenme özellikleri, oksidasyon direnci, dayanıklılık gibi bağlayıcı performansını çeşitli yönlerden iyileştirmek için tasarlanmıştır. Asfalt kaplama endüstrisinde reçineler, polimerler, kauçuklar, kükürt, metal kompleksleri, lif, asfalt bağlayıcı kalitesini arttırmak için çeşitli kimyasal maddeler içeren çok sayıda modifiye katkı kullanılmaktadır (Shen, 2011).

Son yıllarda nanomalzemelerin bitümlü bağlayıcıya katılması çok sayıda araştırmacı ve mühendisin ilgisini çekmiştir. Bir nanopartikül, en az bir boyut 100 nm'den daha küçük olan minyatür bir parçacık olarak tanımlanır. Nano seviyedeki malzemeler hem fiziksel hem de kimyasal olarak önemli derecede farklı davranışlar sergiler ve büyük aktif yüzey alanı gibi doğal özelliklerinden kaynaklanır. Bununla birlikte, küçük partikül boyutu nedeniyle ortaya çıkan örneğin mekân sınırlaması gibi kuantum etkileri gösterirler. (Amiri, 2011; Teizer ve diğerleri, 2011).

Nanomalzeme, özünde bulunan yeni özellikleriyle, asfalt özelliklerini nanometre boyutunda değiştirirler ve bu nedenle çok etkili olurlar. Bu malzemeler, asfalt endüstrisinde, kaplama performanslarının arttırılmasına geniş ölçüde yardımcı olabilecek ve daha uzun süre sonunda bakım gerektiren ve sürdürülebilir kaplamaların yapımında umut vaat eden katkılar sağladığı bilinen modifiye katkıları olarak ortaya çıkmıştır. Nanomalzemeler, bitüm modifikasyonu için büyük aktif yüzey alanlarının bitümlü bağlayıcısı ile etkileşime girmesi ve yüksek maliyeti de hesaba katılarak nispeten daha düşük içeriklerde bitüme eklenmelidir.

1.2 Kapsam

Bu tez çalışması kapsamında tüm veriler, Dokuz Eylül Üniversitesi Prof. Dr. Mehmet ULUÇAYLI Ulaştırma Laboratuvarında yapılan deneysel çalışmalardan elde edilmiştir.

Bu çalışma kapsamında bitüm modifikasyonunda kullanılan nanomalzemeler granül nano-Bentonit ve nano-CaCO₃ katkıları ile nanoteknoloji esaslı sıvı nano-organosilan katkısıdır. Her bir modifiye edici katkı bitüme farklı içeriklerde eklenmiştir. Bu içerikler nano-Bentonit için bitüm ağırlığına %2, %4, and %6, nano-CaCO₃ için %3, %6, ve %9, nano-organosilan için %0,1, %0,2 ve %0,3 olarak kullanılmıştır.

Deneysel çalışmalar iki ana bölümde ele alınmıştır. Birinci bölüm saf bitüm ve nanomalzemelerle modifiye edilmiş bitümler üzerinde yapılan deneyler, ikinci bölüm ise hem katkısız hem de nanomalzemelerle modifiye edilmiş bitümlerle üretilen sıcak karışımlar üzerinde yapılan mekanik deneyleri kapsamaktadır.

Öncelikle, nanomalzemelerle modifiye edilmiş bitüm örneklerinde, nanomalzemelerin bitüm fazı içerisindeki dağılımları bir floresan optik mikroskop yardımı ile belirlenmiştir. Daha sonra saf ve nano malzemelerle modifiye edilmiş bitüm örneklerinin fiziksel ve reolojik özellikleri penetrasyon, yumuşama noktası, döl vizkozimetre, depolama stabilitesi, dönel ince film halinde ısıtma deneyi (RTFOT) ve Dinamik kayma reometresi (DSR) deneyleri ile belirlenmiştir. Son olarak da saf ve nano malzemelerle modifiye edilmiş bitüm örneklerinin mekanik özellikleri ve neme karşı duyarlılıkları sırası ile Marshall karışım tasarımı deneyleri ve Modifiye Lottman test (AASHTO 283) ile ortaya konmaya çalışılmıştır.

1.3 Amaç

Bu çalışma, yukarıda belirtilen üç farklı nano malzemenin bitüm ve asfalt karışımlarının özelliklerine etkisini kapsamlı bir şekilde ortaya koyabilmeyi amaçlamaktadır. Sıvı katkı maddesi olan nano-organosilan'in kullanımındaki amaç ise

bitüm ve asfalt karışımındaki modifikasyon etkilerinin diğer iki mineral dolgu tipi nanomalzemeyle (nano-Bentonit ve nano-CaCO₃) karşılaştırabilmektedir.

Modifiye bitüm örnekleri, bitüm matrisindeki dağılım, termal stabilite, oksidasyon ve reolojik davranışları açısından değerlendirilmiştir. Buradaki amacımız kullanılan nanomalzemelerin bitümün modifiye edilmesine olumlu ve olumsuz katkılarını anlamaktır.

Marshall karışım tasarım yöntemi, modifikasyon katkılarının kontrol karışımlarına kıyasla optimum bağlayıcı içeriği değişimi üzerindeki etkisini ifade etmek için kullanılmıştır. Ayrıca, nano malzemelerle modifiye edilmiş bitümlü bağlayıcılarla hazırlanan asfalt karışımlarının mekanik ve hacimsel özelliklerinin de değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Son olarak, modifiye Lottman testi yapılarak optimum bitüm içeriklerinde hazırlanan kontrol ve modifiye edilmiş asfalt karışım numunelerinin sudan kaynaklanan bozulmalara karşı dirençleri incelenmiştir.

Elde edilen sonuçlar göz önüne alındığında, nano malzemelerle modifiye edilmiş asfalt karışımlarının tasarımı için modifikasyon katkılarının optimum oranı ve bu orana karşılık gelen optimum bitüm içeriği önerilmiştir.

1.4 Tez İçeriği

Bu tez çalışması altı bölüm ve iki ekten oluşmaktadır. Her bir bölüm aşağıda kısaca açıklanacak olursa:

Birinci bölümde, tez çalışmasının tarihsel gelişimi, kapsamı ve amaçları sunulmuştur.

İkinci bölümde, nanomalzeme ve nanoteknolojiye giriş ile ilgili literatür bilgileri açıklanmaktadır.

Üçüncü bölümde, çeşitli tiplerdeki nanomalzemelerin ve nanoteknolojinin asfalt kaplamalarda katkısı, modifikasyon yöntemleri, karakterizasyonu ve nihayetinde sakıncaları ile ilgili literatür bilgileri sunulmaktadır.

Dördüncü bölümde, deneysel çalışmalarda kullanılan malzemelerin tanımı, bitümlü bağlayıcıların nanomalzemeler ile modifikasyon yöntemleri, yapılan deneysel çalışmalardaki test yöntemlerinin ve çalışma kapsamında kullanılan laboratuvar ekipmanlarının özelliklerinin açıklanması ve bitümlü bağlayıcılar ile asfalt karışımları üzerinde gerçekleştirilen deneysel çalışma planının sunumunu içermektedir.

Beşinci bölüm, üç farklı nano malzeme kullanılarak modifiye edilen bitüm ve bu bitümler kullanılarak üretilen nano modifiye asfalt karışımları üzerinde yapılan deneysel çalışma sonuçlarının hem tablo hem de grafik formunda karşılaştırıldığı analiz ve değerlendirmeleri içermektedir.

Altıncı Bölümde ise çalışmadan elde edilen sonuçlar sunularak, gelecekte yapılacak çalışmalar için önerilerde bulunulmuştur.

BÖLÜM İKİ

NANOMALZEMELER VE NANOTEKNOLOJİ

Bu bölümde nano malzemeler ve nanoteknolojide sentez yaklaşımları, sınıflandırılmaları, davranış ve özellikleri ile karakterizasyon yöntemleri anlatılmaktadır. Bölümün sonunda ayrıca, nanomalzeme ve teknolojilerinin uygulama alanları ile ilgili tartışmalar sunulmaktadır.

2.1 Nanomalzemeler ve Nanaoteknolojiye Giriş

“Nanomaterial” kelimesi iki kelimeden oluşan bileşik bir kelime olup; “Materyal” kendini açıklayıcı bir terim iken, “Nano”, temelde Yunanca “nanos” kelimesinden türetilen ve cüce anlamına gelen birim ön ekidir. Nano aslında bir metrenin milyarda biridir ($10^{-9}\text{m} = 1\text{nm}$). Daha iyi anlaşılabilmesi açısından örnekleme yapmak gerekirse, Şekil 2.1’de görüldüğü gibi, nano boyutlu bir malzeme insan saç folikülünün çapından yaklaşık 100.000 kat daha küçüktür (Alagarasi, 2011).

Bir nano malzeme, en az bir boyutunun uzunluğunun 1-100 nm aralığında olduğu, önemli ölçüde küçük ölçekli organik veya inorganik madde olarak tanımlanır. Uluslararası Standardizasyon Örgütü (ISO) ayrıca Nano malzemeyi “nano ölçekteki herhangi bir dış boyutta veya nano ölçekteki içyapılara veya yüzey yapısına sahip bir malzeme” olarak tanımlamaktadır (Boverhof ve ark., 2015).

Nanomalzemeler; metaller, seramikler, polimer malzemeler veya kompozit malzemeler gibi farklı malzemelerdir. Aynı hacim özelliklerindeki malzemelerin sergilemeyeceği benzersiz özelliklere sahip olmaları nedeniyle 21. yüzyılın en umut verici malzemeleri olarak kabul edilmektedirler.

Nanoteknoloji, nano ölçekli malzemelerle ilgilenen ve bu ölçekteki maddeleri sentezlemek, karakterize etmek ve manipüle etmek için çeşitli yaklaşımlar kullanan yeni nesil teknolojidir. Nanoteknoloji aynı zamanda nano boyutlu malzemelerin üretimi, kullanımı ve izlenmesi dahil olmak üzere, atomik-moleküler boyutlu

parçacıkların sentezi, görselleştirilmesi, konfigürasyonu ve izlenmesi olarak da tanımlanmaktadır (CIEL Publication, 2014).

Nano malzeme uygulamalarının tarihçesi 19. yüzyıla kadar uzanır. Micheal Faraday, nano-metal parçacıkların kilise pencerelerinin orijinal rengini nasıl etkilediğini açıklamıştır. Malzemelerin nano ölçekte sentezlenmesi kavramı ilk olarak Richard P. Feynman tarafından öne sürülmüştür. Aralık 1959'da düzenlenen Amerikan Fizik Derneği konferansında malzemelerin kullanım ve izlenmesinin ayrıntılarıyla anlattığı konuşmasını “There is Plenty of Room at the Bottom-Altta Bolca Oda Var” başlığı altında sunmuştur (Feynman, 1960).



Şekil 2.1 Büyük ölçekli nesnelerle karbon nanotüp boyut karşılaştırmasının gösterimi (Alagarasi, 2011)

Birçok bilim adamı bu araştırmalardan ilham alarak konuyu daha da ileriye götürmek üzere çalışmalarını genişletti. On yıl sonra, 1974 yılında “Conference on Precision Engineering (ICPE)” Konferansı'nda Prof. Norio Taniguchi bu teknolojiyi “Nanoteknoloji” olarak adlandırdı (Taniguchi, 1974). Norio, parçaların 0,1 ila 100 nm aralığındaki boyutlarda ve tolerans aralığında hassas imalatını anlatmıştır. Bu terim, ilk olarak mikrometre ölçeğinde malzeme ve mühendislik kontrolünün ötesine geçen yeni bir teknolojiyi bugünkü anlamında nanoteknolojiyi açıklamıştır (Abdullah ve diğerleri, 2015). Daha sonra Drexler, bugünkü nanoteknolojinin anlamı ve uygulamalarıyla daha yakından ilgili olan yeni bir yaklaşımla ortaya çıkmıştır

(Drexler, 1981). Bu yeni yaklaşım, atom-atom izleme, ağır teknolojik işleme metodolojisine karşılık gelmektedir (Zhu ve diğ., 2004; Sahoo ve diğ., 2007).

Modern nanoteknolojinin uygulanması düşüncesi, tek tek atomların görülmesini sağlayan tarama tüneli mikroskopunun kullanılmaya başlandığı 1981 yılına kadar çok uzak ihtimal görünüyordu. Daha sonra, 1990'ların başlarında Huffman ve Kraetschmer, büyük miktarlarda fulerenlerin (C60) saflaştırılması için sentezleme yöntemini araştırdı (Cao, 2004; Iijima ve Ichihashi, 1993). Bu keşif çeşitli endüstrilerden araştırmacılara yardımcı olarak daha kapsamlı çalışmalar için umut ışığı olmuştur. Günümüzde, her geçen gün nanoteknolojide yeni gelişmeler yaşanmaya devam etmektedir.

2.2 Nanomalzemelerin Başlıca Özellikleri

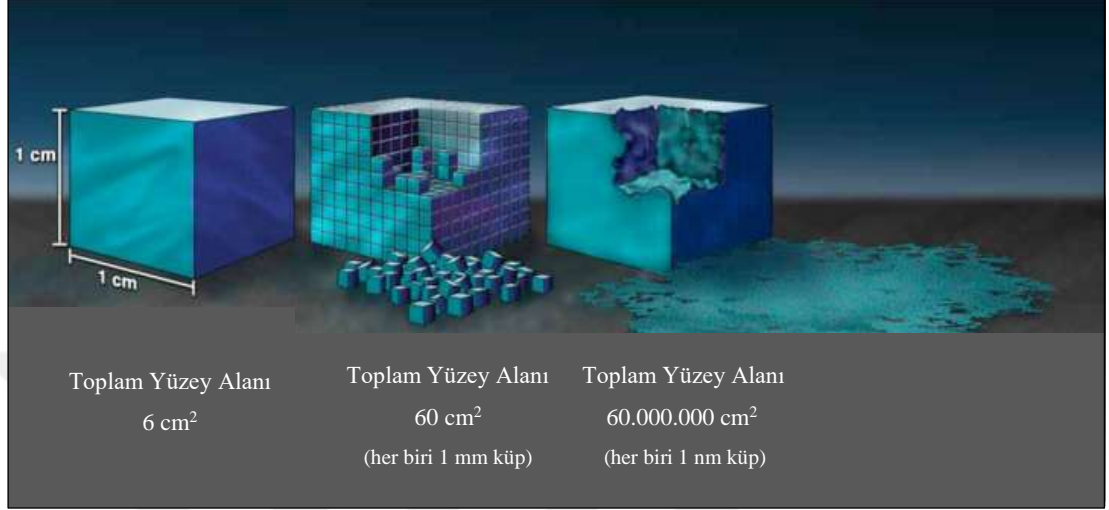
Çağdaş dünyada esas olarak iki tür nanomalzeme vardır; Doğal olarak oluşan nanomalzemeler ve mühendislik nanomalzemeleri (ENM). Mühendislik nanomalzemeleri, hacim özelliklerine göre karşılaştırıldığında çok farklı ve önemli ölçüde geliştirilmiş özellikler sergileyen yapay olarak sentezlenmiş malzemelerdir.

Hacimli malzemeler, bilinen malzemelere tanınmayan bazı avantajlı yeni özelliklere sahip daha küçük boyutlu malzemeler üretmek için nanomalzeme boyutunda minyatürleştirilmiştir. Nanomalzemelerin temel iki özelliği; daha yüksek göreceli yüzey alanı ve Kuantum etkisi hakimiyetidir.

Maddenin boyutu küçüldükçe, birim kütle başına düşen yüzey alanı artar. Bu, yüzeyde nispeten daha fazla atomun reaksiyona girmesi anlamına gelir. Nanomalzemelerin bu özelliği, Şekil 2.2 referans alındığında daha kolayca anlaşılabilir. Belirli bir malzemenin hacmi ile karşılaştırıldığında daha fazla yüzey alanı, kimyasal maddelerin harici maddelerle kimyasal olarak etkileşime girmesi nedeniyle artan yüzey reaktivitesine yol açar.

Nano boyuttaki malzemeler, büyük ölçüde Kuantum etkileriyle baskındır ve bazı benzersiz optik, manyetik, elektrik ve diğer özellikleri gösterir. Ortaya çıkan bu

özellikler, elektronik, tıp, mühendislik ve diğer bazı alanlar üzerinde potansiyel olarak büyük bir etkiye sahip olabilir. Nanomalzemelerin kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri üzerinde geniş araştırmalar yapılmaktadır.



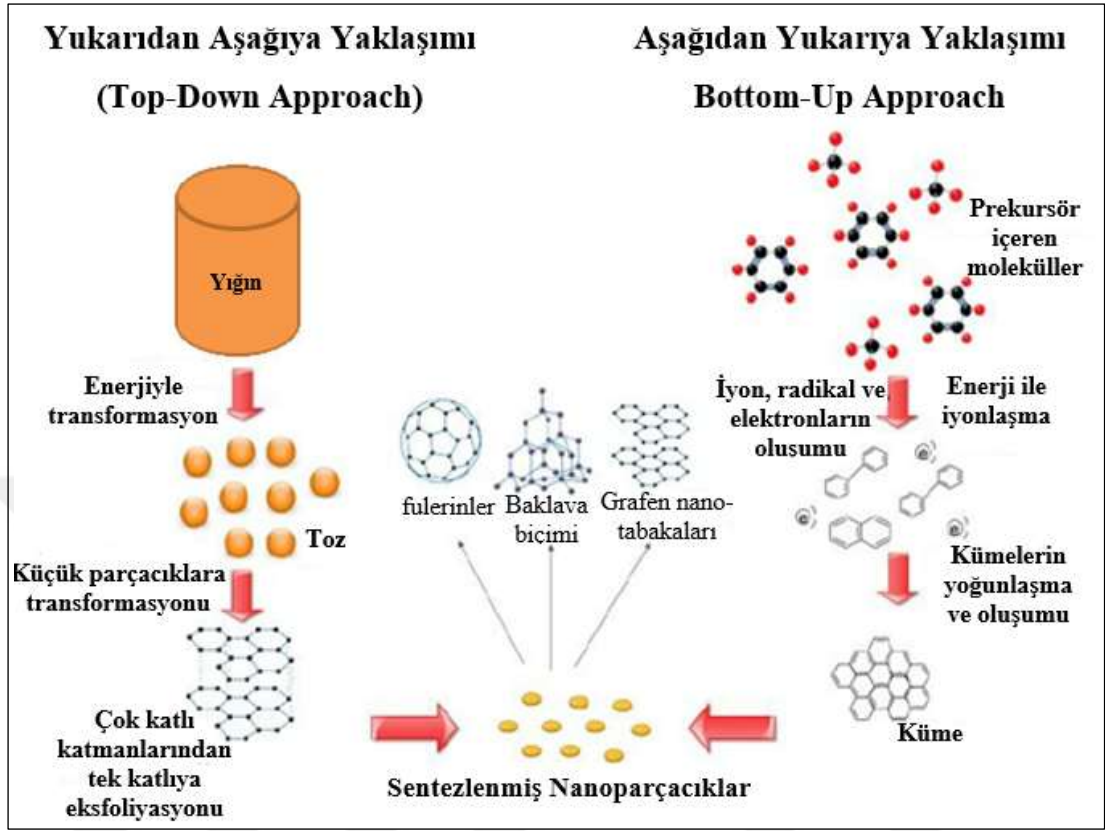
Şekil 2.2 Nano boyutlu malzemelerin artan yüzey alanının etkisinin illüstrasyonu (Nanotechnology 101, b.t.)

2.3 Nanomalzemelerin Sentezlenmesi ve İşlenmesi

Mühendislik nanomalzemelerinin sentezi yapay olarak genellikle yaygın olarak bilinen iki “Top-Down” ve “Bottom-Up” yaklaşımı ile yapılır. “Top-Down” yaklaşımında esas olarak, hacimli malzemelerin öğütülerek parçalandığı ve Nano boyutlu malzemelere dönüştürüldüğü (tipik olarak Mekanik öğütme yöntemi ile) üretimi temsil eder. Diğer taraftan, “Bottom-Up” yaklaşımında, küçük atomlar, moleküller ve kümeler, kimyasal bir işlemle birbirlerine bağlanarak istenilen özelliklerde nanomalzemeler oluşturulur.

Nanopartiküllerin temel özellikleri ve yapısı, kullanılan deney koşullarına bağlı olarak belirlenebilir. Nanomalzemeler için yapay yaklaşımın tam olarak anlaşılması, malzeme özelliklerinin yeni özelliklerle üretilmesi açısından son derece önemlidir. Bugüne kadar, kimyasal buhar biriktirme, sol-jel, PLS, püskürtme, mekanik öğütme ve diğerleri gibi yukarıdan aşağıya ve aşağıdan yukarıya yaklaşımlarla çeşitli ilgili teknikler uygulanmaktadır (Habiba ve diğ., 2015).

İki sentezleme yaklaşımının şematik temsili ve farkları Şekil 2.3'te gösterilmiştir.



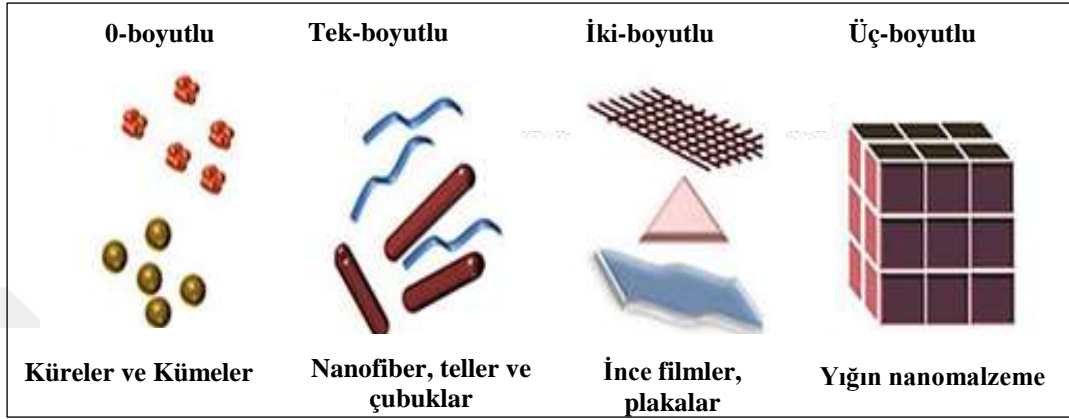
Şekil 2.3 Nano ölçekli malzemelerin sentezinde yukarıdan aşağıya ve aşağıdan yukarıya yaklaşımların gösterimi (Habiba ve diğ., 2015)

2.4 Nanomalzemelerin Yapısal Olarak Sınıflandırılması

Uzunluğu 100 nm'den küçük olan tane boyutlarının sayısı göz önüne alınarak, nanomalzemeler sıfır, bir, iki ve üç boyutlu nano yapılar olarak sınıflandırılabilir (Şekil 2.4).

Sıfır boyutlu nanomalzemeler, üç dış boyutunun hepsinin nano ölçülere sahip olması; yani (x, y, z) 1-100 nm arasındaki aralıkta, örn. nanopartiküller, nanoyığın ve Nano-küreler. "Nanoparçacık" terimi genellikle sıfır boyutuna sahip olan tüm malzemeyi kapsar ve amorf veya kristalli malzemeler olabilir. Tek boyutlu nanomateryaller, 1-100 nm arasındaki aralıkta iki boyuta (x, y) sahipken, üçüncü boyut, 100 nm uzunluğunu aşan, örn. Nano teller, Nano çubuklar ve Nano tüpler. İki boyutlu nanomateryaller, tek boyutlu (z) 1-100 nm arasındaki aralıkta olanlardır. nano

kaplamalar, nano tabakalar, nano filmler. Genellikle tekil veya çoklu katmanlı yapılar olarak kullanılırlar. Üç boyutlu nanomalzemeler aynı zamanda boyutları nano ölçülerle sınırlı olmayan hacimli nanomalzemeler olarak da adlandırılır. Bu malzemeler, 100 nm uzunluğunu aşan üç keyfi boyuta sahip olarak karakterize edilir.



Şekil 2.4 Nanomalzemelerin farklı yapısal biçimleri (Bhattacharya, 2014)

2.5 Nanomalzemelerin Karakterizasyonu

Nanomalzemelerin karakterizasyonu, yüzey analiz tekniklerine ve geleneksel karakterizasyon yaklaşımlarına dayanmaktadır (Abdullah ve diğerleri, 2015). Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM), Transmisyon elektron mikroskobu (TEM) ve taramalı elektron mikroskobu (SEM), X-ışını kırınımı (XRD), küçük açılı X-ışını saçılımı (SAXS) ve Küçük açı nötron saçılımı (SANS) gibi çeşitli gelişmiş mikroskobik karakterizasyon teknikleri kullanılır. Bu teknikler arasında, kaplama endüstrisinde nanomalzemeleri ve nanoyapıları karakterize etmek için en yaygın olarak kullanılanlar (XRD), taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve Alan Emisyon Taramalı Elektron Mikroskobu (FE-SEM) dahil olmak üzere çeşitli elektron mikroskobu (EM) yöntemleri bulunmaktadır (Abdullah ve diğ., 2015).

Bu teknikleri kullanmanın amacı, nano ölçekli malzemelerin büyüklüğünü, morfolojisini ve yüzey yükünü karakterize etmektir (Bhatia, 2016). Bu tekniklerin açıkça artıları ve eksileri vardır, ancak genellikle nano-endüstride tercih edilen yöntemlerdir (Wittstock, 2000). Nanopartiküllerin ortalama partikül çapının belirlenmesi ve diğer malzemelerin (örneğin asfalt bağlayıcı) sürekli fazında

nanopartiküllerin dağılımı gibi özellikleri, bu karmaşık deneysel ekipmanlar kullanılarak gerçekleştirilir.

2.6 Nanomalzeme Uygulamaları

Nanoteknoloji, bilim adamlarının, maddenin özelliklerini çok iyi bir şekilde anlamalarını ve kontrol etmelerini sağlamıştır. Nanoteknoloji ile üretilen nanomalzemeler, kozmetik, ilaç, tekstil, elektrik ve elektronik, gıda, inşaat endüstrisi gibi çeşitli sektörlerde uygulama alanlarına sahiptir. Nanomalzemeler, düşük dozaj, nispeten daha reaktif, mekanik olarak stabil ve buna benzer pek çok olumlu yönüyle tanınmışlardır. Yeni karmaşık cihaz ve tekniklerin piyasaya sürülmesiyle, atom-atom ya da molekül-molekül düzeyde nano malzeme ve nano nesnelerin oluşumu, bu malzemeleri birçok sektörde uygulanabilir hale getirmiştir. Aynı zamanda bilim adamları ve mühendisler için favori bir araştırma konusu olmuştur.

BÖLÜM ÜÇ

ASFALT ENDÜSTRİSİNDE NANO MALZEMELER

Bu bölüm, asfalt kaplamalarda nanomalzemelerin kullanımının tarihsel gelişimini, nano-modifiye bitümün yapısal ve morfolojik özellikleri ile değerlendirme tekniklerini kapsamaktadır. Ayrıca, yaygın olarak kullanılan nanomalzeme çeşitleri, optimal kullanım oranları, modifikasyon prosedürleri ve bitüm ile asfalt karışım özellikleri üzerindeki etkilerini içeren literatür taraması bu bölüm kapsamında sunulmuştur. Son olarak, asfalt modifikasyonlarında nanomalzeme kullanımının avantaj ve dezavantajları kısaca açıklanmıştır.

3.1 Giriş

Sürekli artan trafik yükleri ve çevresel koşullardaki değişiklikler, kaplamaların ana bozulma faktörleri olarak kabul edilmektedir. Yıllarca, asfalt karışımlarında bağlanma özelliklerini sağlamak için tek yaklaşım, agrega ile saf bağlayıcı bitümü bir araya getirerek karıştırmaktır (Reubush, 1999). Esnek kaplamalarda, asfalt karışımlarında bağlayıcı madde olarak işlev gören konvansiyonel asfalt bağlayıcı, sürdürülebilir kaplama yapımı için yeterli olmayabilir ve güçlendirmeye ihtiyaç duyabilir. Bu durum, araştırmacıların ve yol otoritelerinin, kaplamaların belirli bir esnek kaplama hizmet ömrü boyunca meydana gelen problemlere dayanıklılığını sağlamak için güvenilir ve aynı zamanda ekonomik alternatif bir yol bulma arayışına ilham vermiştir. Bitümün modifiye edilmesi yaklaşımı, saf bitümlü bağlayıcının geleneksel özelliklerinin değiştirildiği ve böylece sürdürülebilir ve potansiyel olarak tatmin edici bir performans sergileyebilen, istenilen özelliklerdeki kaplamaların elde edildiği en iyi alternatif olarak görülmüştür.

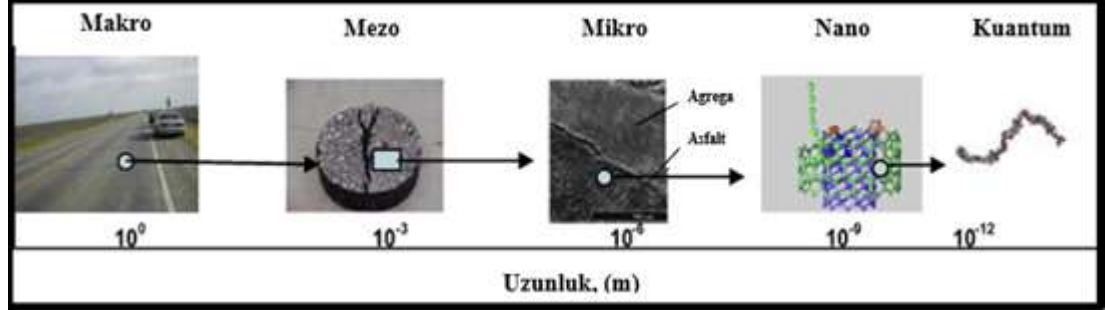
Asfalt bağlayıcı modifikasyonu, genel olarak adezyon, sıcaklık hassasiyeti, sürtünme özellikleri, oksidasyon direnci, yaşlanma direnci ve kalıcılık açısından genel bağlayıcı performansını arttırmak üzere tasarlanmıştır. Malzemenin kalitesini arttırmak için reçineler, polimerler, kauçuklar, kükürt, metal kompleksleri, fiberler ve kimyasal maddeler gibi çeşitli modifiye edici katkıları kullanılır (Shen, 2011).

Son zamanlarda, nanoteknoloji yavaş yavaş modifiye ediciler olarak kullanılan çeşitli nanomalzemelerle asfalt modifikasyonu alanına dahil edilmiştir (You ve diğ., 2011; Fang ve diğ., 2013). Bilindiği üzere, nanomalzemeler nanoteknolojinin bir türevi olduğu bilindiği gibi, Nanoteknoloji'nin kendisi, en az bir boyutu nanometre ölçeğindeki (bir metrenin milyarda biri (10^{-9} m)) en küçük fonksiyonel organizasyona sahip malzeme ve cihazların tasarımı, sentezi, karakterizasyonu ve uygulamasında yer alan teknoloji ve bilim olarak tanımlanmaktadır (Sahoo ve diğerleri, 2007). Ayrıca nanomalzemeler, morfolojik olarak nano boyutta ve en az bir uzunluğu 1 ila 100 nm arasında bir uzunluğa sahip olan malzemelerdir. Bu malzemeler asfalt endüstrisinde kaplama performanslarının artırılmasına yardımcı olabilecek favori modifiye edici katkıları olarak ortaya çıkmıştır.

Hernekadar mühendisler ve yol yapımcıları malzemelerin mezo ve mikro ölçekte davranışlarını araştırmakla birlikte, mikro ve nano ölçekler bilim ve teknolojiyi geliştirmek için temel bilgiler sağlar (You ve diğ., 2011). Yol yapımında bu malzemelerin çoğunlukla büyük ölçekte ve büyük miktarlarda kullanılmalarına rağmen, asfaltın makroskobik mekanik davranışı, mikro ve nano ölçekte mikroyapı ve fiziksel özelliklere büyük ölçüde bağlıdır (Partl ve diğ., 2004). Ayrıca, nanomalzemeler, makroskobik boyutta malzemeler ile atomik / moleküler yapılar arasında etkili bir köprü görevi görmektedir (Fang ve diğ., 2013).

Son yıllarda asfalt modifikasyonunda nanomalzemelerin kullanımı araştırmacıların önemli bir ilgisini kazanmış ve bu konu hakkında pek çok çalışma yapılmıştır. Kaplamalar için asfalt modifiye edici olarak nanomalzeme kullanımı eğiliminin arkasındaki temel neden, Hacmine oranla belirgin bir şekilde daha yüksek yüzey alanı, küçük boyutları ve büyük fraksiyonlu yüzey atomları, mekansal sınırlama (makroskobik kuantumun tünelleme etkisi) ile önemli ölçüde daha yüksek reaktiflikten kaynaklanan kuantum etkileri gibi nano boyutlarının neden olduğu benzersiz fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip olmasından kaynaklanmaktadır. (Yao ve diğ., 2012). Ayrıca, makro boyuttan nano boyutuna kadar malzeme boyutlarındaki azalma, optik absorpsiyon, kimyasal reaktivite, elektronik iletkenlik ve hatta mekanik özellikler

açısından bazı belirgin değişiklikler getirmektedir (Roco ve diğ., 2000). Şekil 3.1, asfaltın makro boyuttan kuantum boyutu aralığındaki değişimini göstermektedir.



Şekil 3.1 Çeşitli boyutlarda asfaltın değişimini gösteren illüstrasyon (You ve diğ., 2011)

Asfalt modifikasyonları araştırma alanında sağlam bir zemin oluşturmanın bir sonucu olarak, National Science Foundation (NSF-Ulusal Bilim Vakfı) Ağustos 2006'da ABD'de “Bağlayıcı Maddelerinin Nanomodifikasyonu” başlıklı bir çalıştay gerçekleştirilmiştir. Çalıştay oturumları asfalt betonunun iyileştirilmesi için nanoteknolojinin uygulanması konusuna odaklanmıştır. Bu çalıştayın ana sonuçlarından biri, nanobilim ve nanoteknolojinin asfalt kaplama teknolojisinde iyileştirmelere yol açabileceği olup aynı zamanda “Asfalt Nanomalzeme Bilimi” alanı da kurulmuştur (You ve diğ., 2011; Steyn, 2009).

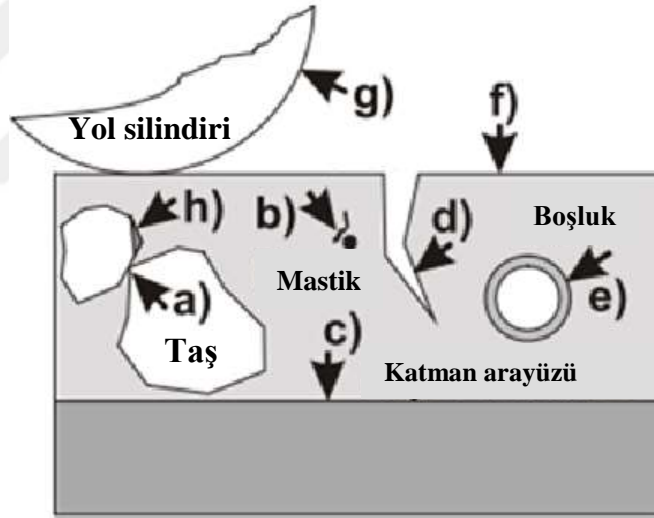
Federal Highway Administration (FHWA- Amerikan Federal Karayolu İdaresi)’ne göre, asfalt modifikasyonunda nanomalzemelerin uygulanması, kaplamaların hizmet ömrünü uzatabilir (Azahara ve diğ., 2015).

Genel olarak bitümlü malzemelerde modifiye edici olarak kullanıldığında nanoteknoloji uygulamaları birçok fayda sağlar (Yang ve Tighe, 2013). Bu faydalar; polimer modifiye bitümlerin (PMB) yüksek sıcaklık depolama stabilitesinin artırılması, yaşlanmanın ve nem duyarlılığının azaltılması, düşük sıcaklık özelliklerinin iyileştirilmesi, kaplama kalıcılığının iyileştirilmesi ve bakım maliyetlerinin azaltılması olarak sıralanabilir (Enieb ve Diab, 2017).

Nanomateryallerle yapılan asfaltın modifikasyonu, aşağıdaki olumlu özellikleri de sunabilir (Amiri, 2011):

- Sera gazı emisyonlarının sınırlanması
- Nispeten daha az enerji tüketimi
- Trafik gürültüsünde azalma
- Rahat ve güvenli sürüşün sağlanması
- Araçların yol yüzeyinden kaynaklanan problemlerle karşılaşma olasılıklarında azalma.

Yenilikçi nanoteknolojinin uygulanmasıyla potansiyel olarak asfalt kaplamalarda iyileştirilmek üzere odaklanılması gereken farklı bölgeler Şekil 3.2'de gösterilmektedir (Partl vd., 2004).



Şekil 3.2 Asfalt kaplamalarda nanoteknolojinin bir araya getirilmesiyle iyileştirilmek üzere odaklanılacak bölgeleri tespit eden illüstrasyon (Partl ve diğ., 2004)

- a) Agrega taneleri arasındaki gerilme kayma
- b) Sıkıştırma, kalıcılık ve kohezyonun iyileşmesi
- c) Tabakalar arasındaki bağ yeteneği
- d) Gençleştirici ve kendi kendine iyileşme ajanları
- e) Bitümlü bağlayıcının yaşlanması
- f) Yüzey özellikleri, temizlik ve su geçirimsizlik

- g) Sıkıştırma sırasında silindire yapışmanın engellenmesi
- h) Agrega ve bağlayıcı arasındaki bağlanma yeteneği

Nano-tüpler, nano elyaflar, polimerize tozlar, Nano-boyutlu plastik tozlar, Nano-hidratlı kireç, Nano-silis ve Nano-kil gibi özel amaçlar için asfalt modifikasyonunda kullanılan çeşitli tiplerde nanomalzemeler mevcuttur (Yusoff ve diğ., 2014).

3.2 Bitümlü Malzemelerin Nanomalzemelerle Modifikasyonu

Nanomalzemelerle istenildiği gibi çalışabilmesi için asfalt bağlayıcı matrisinde düzgün bir şekilde dağılmaları gerekmektedir. Nanoparçacıklar bitümlü bağlayıcıya eklendiğinde topaklanma eğiliminde olacak ve böylece muntazam bir şekilde dağılmak yerine bir araya gelerek kümelenme yapıları oluşturacaktır (Li ve diğ., 2017). Bu topaklanma probleminin arkasında yatan sebep araştırmacılar tarafından Ostwald olgunlaşması ve Van der Waals çekim gücünün ortaya çıkması ile ilişkilendirilmiştir (Yao ve diğ., 2012). Uygun olmayan dağılımın neden olduğu nanoparçacıkların topaklanması nedeniyle, daha büyük hacimli malzemeler gibi davranacaklar ve kendilerinden beklenen iyileştirme özelliklerini sergileyemeyeceklerdir. Ayrıca bitümün kendine has mekanik ve reolojik özelliklerine de zarar verirler. Uygun olmayan bir modifikasyon ve karıştırma yöntemi, nanoparçacıkları potansiyel olarak indirgeyecek ve sonuç olarak malzemelerin özelliklerini önemli ölçüde bozacaktır (Faramarzi ve diğ., 2015). Bu nedenle, uygun bir karıştırma yaklaşımının benimsenmesi, bitüm matrisinde nanoparçacıkların homojen dağılımını sağlamak için çok önemlidir (Li ve diğ., 2017).

Genel olarak, bitümün nanomalzemelerle modifikasyonu için kullanılan iki ortak yaklaşım vardır (Shen, 2011). Bunlardan en yaygın kullanılanı yüksek hızda kesme uygulayarak karıştırma (kuru harmanlama) yöntemidir. Bu yöntemde nanomalzemeler yüksek hızlı bir kesme mikseri kullanılarak bitüm içerisinde eşit olarak dağıtılabilir. Diğeri ise çözücü karıştırma yöntemi olarak da bilinen yöntemdir (Fang ve diğ., 2013).

3.2.1 Kuru Karıştırma Yöntemi (Yüksek Hızlı Kesme Mikseri Kullanarak)

Uygulama kolaylığı ve etkinliği nedeniyle, bu yöntem yaygın olarak tercih edilmektedir. Modifiye bitümlerin üretimi için kullanılan nispeten uzun süredir başarı ile kullanılan bir teknolojidir. Bu yöntem iki adımda gerçekleştirilir; Nanomalzemelerin bitümlü bağlayıcısına doğrudan katılması ve nano boyutlu parçacıkların bitüm içinde düzgün ve homojen dağılımını sağlamak için yeterli bir süre boyunca karıştırmak (Li ve diğ., 2017).

Shirakawa ve diğerlerinin karbon nanotüplerle (CNT) bitümlü bağlayıcıyı modifiye etmek için yaptıkları bir çalışmada, sonikasyon işlemi ile harmanlama işlemi kombine edilerek manyetik karıştırıcı gibi kuru harmanlama için çeşitli tipte aletler kullanılmıştır (Shirakawa ve diğ., 2012). Karıştırma amacı ile daha sıklıkla kullanılan bir başka cihaz, bitümlü bağlayıcı içinde nanomalzemelerin homojen olarak yayılmasını temin etmek için kullanılan yüksek hızlı bir kesme mikseridir.

Nanomalzemelerin maliyeti ve bitüm fazındaki dağılımı dikkate alınarak, nanomalzemeler genellikle daha küçük yüzdelerde/oranlarda bitüme eklenir. Ayrıca, bitümün viskozitesi nispeten daha yüksektir çok daha karmaşık bileşenler içerdiğinden asfalt bağlayıcı içinde homojen dağılımı zorlaşır. Bu problemin üstesinden gelmek için, bağlayıcının viskozitesi sıcaklığın artışı ile azaltılarak nanomalzemelerin bitüm içerisinde daha kolaylıkla dağılması temin edilir (Brownian hareketi). Diğer yandan, bu karıştırma işlemi sırasında sıcaklığın yükseltilmesi asfalt bağlayıcının yaşlanmasına neden olabilir. Bu nedenle, uygun bir sıcaklığın ve ayrıca çok uzun olmayan bir karıştırma süresinin belirlenmesi çok önemlidir (Fang ve diğ., 2013).

3.2.2 Çözücüde Eritme Yöntemi

Asfalt bağlayıcının viskozitesini azaltmak ve aynı zamanda bitüm fazında nanoparçacıkların çözünmesini kolaylaştırmak amacıyla gazyağı, varsol, terpantin ve aseton gibi çeşitli tipte solventler belirli içeriklerde kullanılır. Gazyağı, yaygın ve ucuz olması nedeniyle daha çok tercih edilen ve yaygın olarak kullanılan çözücüdür.

Çözücü ve nanoparçacıklar birlikte bitüme eklendikten sonra, düşük hızlı bir kesme mikseri kullanılarak, çözücü yeterince buharlaşana kadar orta ve yüksek sıcaklık koşullarında karıştırılır (Li ve diğ., 2017). Çözücü kullanımının, nanomalzemeler ile bitüm arasında potansiyel olarak bir köprü işlevi görerek bitüm matrisindeki nanoparçacıkların homojen olarak dağılımının sağlanabileceği kanıtlanmıştır (Khattak ve diğerleri, 2013). Ayrıca, çözücü karıştırma tekniğini geçerli bir yöntem haline getirmek için uygun bir çözücü seçmenin çok önemli olduğuna inanılmaktadır (Li ve diğ., 2017). Bir çözücü seçilirken aşağıdaki kriterler dikkate alınmalıdır (Khattak ve diğerleri, 2012):

- Çözücü, bağlayıcının fiziksel ve mekanik özelliklerini önemli ölçüde değiştirmeden, normal oda sıcaklığında asfalt bağlayıcı içinde kolayca çözülebilir olmalıdır.
- Seçilen çözücü, nanomalzemelerin orta ve yüksek sıcaklıklarda bitümlü bağlayıcıya tam olarak yayılmasını kolaylaştırmak için düşük viskoziteye ve yüksek buharlaşma oranlarına sahip olmalıdır.

Her iki yöntemi de değerlendirerek, çözücü karıştırma tekniğinin, nanomalzemelerin bağlayıcı faza daha iyi yayılmasının sağlanabildiği sonucuna varılmıştır. Bununla birlikte, çözücü eritme yöntemi nispeten daha karmaşıktır ve bir araştırmada, çözücünün asfalt bağlayıcı maddenin diğer özelliklerini olumsuz etkileyebileceği ortaya konmuştur (Fang vd., 2013). Ayrıca, bu yaklaşımın daha fazla enerji tüketimi ile ekonomik ve çevresel faktörler açısından olumsuzlukları olması nedeni ile dezavantajlıdır (Li vd., 2017). Bu gerçek, Faramarz ve diğerleri tarafından yürütülen bir çalışmada ortaya konmuştur. Çalışma sırasında, sadece 1,28 gr Karbon nanotüp (CNT) çözmek için toplam 120 ml gazyağı kullanılmış ve bu da maliyet ve enerji tasarrufu açısından olumsuz sonuçlara işaret etmektedir (Faramarzi ve diğ., 2015).

Bu tez çalışması kapsamında, nanomalzemelerle modifiye bitüm üretmek için laboratuvarlarda ve sahada yaygın olarak kullanılan yüksek hızlı kesme mikseri kullanılmıştır.

3.3 Nanomodifiye Bitümlü Bağlayıcıların Karakterizasyonu

Makro ve mikro boyutlu malzemelerin karakterizasyonu için yol kaplama mühendisliği alanında çeşitli hassas teknikler bulunmaktadır. Ancak, bu tekniklerde hala çözülmemiş bazı kusurlar bulunmaktadır (Li ve diğ., 2017). Yol kaplama mühendisliği alanında nanomalzemelerin yapısal davranışlarını ve morfolojilerini anlamak için öncelikle nano boyutlu malzemelerin özelliklerini anlamak önemlidir (Azahara ve diğ., 2015). Bu amaçla, Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM), Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM), X-Işını Kırınımı (XRD), Fourier Transform Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR) ve Nano-CT taraması gibi çeşitli tekniklerle nanomodifiye bitümlü bağlayıcılar (Kostoff) üzerinde çalışmalar yürütülmektedir (Kostoff ve diğ., 2007; Li ve diğ., 2017). Yukarıda belirtilen teknikler ve araçlar arasında, ince kesitlerdeki bir yapıyı değerlendirmek için TEM ve STEM uygun birer yöntemdir. Bununla birlikte SEM yada AFM, asfaltın Nano ölçekli özelliklerini değerlendirmek için kullanılmaktadır. SEM ve AFM, Nano boyutlu parçacıkları 40 ila 50 nm'lik bir boyutta gözlemlemek ve değerlendirmek için kullanılan aletlerdir (Azahara ve diğ., 2015).

3.4 Asfalt Modifikasyonunda Genel Olarak Kullanılan Nanomalzemeler

Son yıllarda, temel fiziksel, reolojik ve mekanik özelliklerini değiştirmek için asfaltın modifikasyonunda kullanılan çok sayıda nanomalzeme bulunmaktadır. Nanomalzemeler, bileşimindeki baskın malzemeye bağlı olarak, organik nanomalzemeler, metalik nanomalzemeler ve inorganik metalik olmayan nanomalzemeler olarak sınıflandırılabilir (Li ve Li, 2014).

Bir nanomalzeme tipinin seçimi tamamen, modifikasyonun yapıldığı spesifik gereklilikler ve amaçlara dayanmaktadır. Asfalt kaplama endüstrisinde kullanılan nanomalzemeler nano kil, nano silika, nano titanyum, nano hidratlı kireç, nano boyutlu plastik tozlar veya polimerize tozlar, nano elyaflar, nanotüpler ve diğerleridir (Jahromi ve Khodaii, 2009; You ve diğ., 2011; Khattak ve diğ., 2012; Yao ve diğ., 2012; Yusoff ve diğ., 2014). Bu araştırma kapsamında, esnek kaplamalarda kullanılan bağlayıcıların

modifikasyonu için yaygın olarak kullanılan nanomalzeme türleri aşağıda sırasıyla tanımlanmıştır.

3.4.1 Nanokil

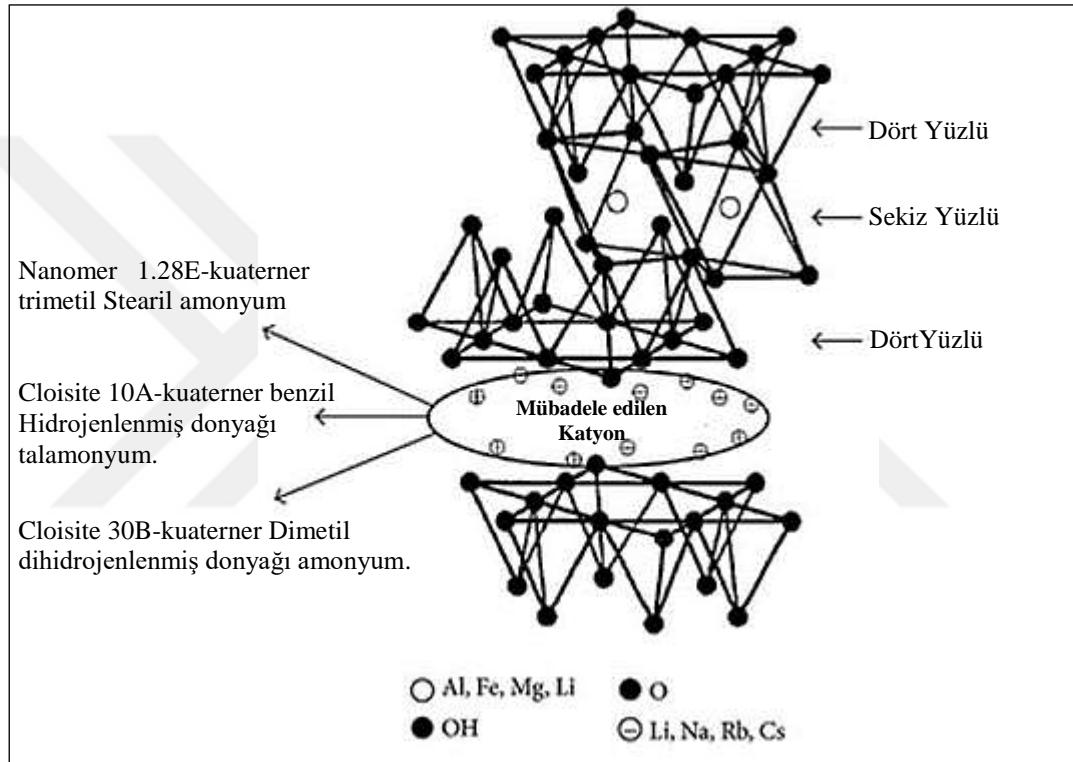
Nanokil (Katmanlı silikat), 1 ila 100 nm arasında bir tabaka kalınlığına sahip olan ve genellikle bitümün mekanik ve termal özelliklerini geliştirmeyi amaçlayan, doğal olarak oluşan mineral kil olarak tanımlanmaktadır (Li ve diğ., 2017). Kil disklerin birbirinden ayrılmasının sonucunda, büyük bir aktif yüzey alanına (700-800 m²/g'ye kadar) sahip bir nano-kil oluşur. Büyük aktif yüzey alanı nano-kil ve bitüm fazı arasındaki etkileşimi kolaylaştırır (Yang ve Tighe, 2013).

Günümüzde çok sayıda araştırmacı, doğada kolay bulunabilirliği ve nispeten düşük maliyeti nedeniyle (Li ve diğ., 2017), bitümün performansı üzerindeki etkisini araştırmak için nano-kil kullanmıştır (Jahromi ve Khodaii, 2009; Polacco ve diğ., 2008; Van de Ven ve diğ., 2008). Nanoclay ayrıca yüksek saflık ve uyumlu MMT parçacıklarından oluşur. Çalışmaların çoğunda nano-kil içeriği bitümün ağırlıkça %3 ila %6 arasında değişmektedir (You ve diğ., 2011; Yarahmadi ve diğ., 2010; Ghile, 2006; Jahromi e Khodaii, 2009).

Nanoclay üzerinde yapılan bir araştırmada, küçük bir nanoclay içeriğinin modifiye edilmiş bağlayıcının çekme dayanımı, sertlik modülü, ısıl kararlılık ve eğilme mukavemeti gibi farklı fiziksel özellikleri potansiyel olarak geliştirebileceği sonucuna varılmıştır. Bu gelişmeler, nanoskopik seviyedeki nano-tabakanın homojen dağılımı ile mümkün olabilmektedir. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlara dayanarak, nano katmanlı modifiye bağlayıcının esnekliğinin modifiye edilmemiş bitüm ile karşılaştırıldığında anlamlı derecede yüksek olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca, mekanik enerji yayılımı da çok düşüktür (Jahromi ve Khodaii, 2009).

Bugüne kadar yapılan araştırmalara dayanarak, nanokil (NMN) genellikle saf bitümlü bağlayıcıya eklenere polimer modifiye asfalt bağlayıcı (PMN) olarak bilinen malzemeye dönüştürülür (Li ve diğ., 2017). En çok tercih edilen ve kullanılan tabakalı silikat nano-kil, montmorillonittir (MMT). Şekil 3.3'te gösterildiği gibi, MMT, 2:1

katmanlı bir yapıya sahiptir; iki silika tetrahedronla birleştirilmiş alümina oktahedron (Ray ve Okamoto, 2003). MMT'nin çevre dostu olduğu kanıtlanmıştır ve aynı zamanda çok ayrıntılı olarak incelenen ve anlaşılan bir tür yapı ve kimyaya sahip olduğu haliyle kolayca temin edilebilir. İki farklı türdeki MMT (MMT-1 ve MMT-2) ile modifiye edilen bitüm için elde edilen sonuçlara göre, FTIR testi ve SEM görüntüleri yardımıyla, MMT modifiye asfalt bağlayıcının hem mekanik hem de reolojik performansının artırıldığı sonucuna varılmıştır (Liu ve diğ., 2011).



Şekil 3.3 MMT nanokilin kimyasal yapısının şematik görünümü (Tcherbi-Narteh ve diğ., 2013)

Başka bir çalışmada bitüm, normal Bentonit kil (BT) ve organik olarak modifiye edilmiş Bentonit (OBT) ile modifiye edilmiştir. Modifiye edilmiş bitümlü bağlayıcının hazırlanması için sonikasyon ve kesme gerilmesi ile birlikte eriyik harmanlama usulü kullanılmıştır. Çalışmada, modifikasyona bağlı olarak bitümün tekerlek izi direncinde iyileşme olduğu görülmüştür. Ayrıca modifikasyonun, düşük sıcaklık reolojik davranışı ve düşük sıcaklık çatlama direnci açısından bitümlü bağlayıcı üzerinde bazı ek olumlu etkileri de bulunmaktadır (Zare-Shahabadi ve diğ., 2010a; Yang ve Tighe, 2013).

Nanoclay modifiye bağlayıcı ayrıca daha yüksek kompleks kesme modülü ve daha düşük gerilme şekil değiştirmesi sergilemiştir. Ek olarak, nanokilin bitüme ilavesi, nem duyarlılığında bir azalmaya neden olmuştur (Goh ve diğ., 2011; You ve diğ., 2011). Ghile, Cloisite nanokilini modifikasyon katkısı olarak kullandığı araştırmada yaptığı mekanik testlerde; modifiye asfalt karışımlarının dolaylı çekme dayanımı, yorulma ve tekerlek izi dayanımını iyileştirildiği sonucuna varmıştır (Ghile, 2006). Yine Cloisite nanokilinin modifikasyon katkısı olarak kullanıldığı bir başka araştırmada, modifiye bitümlü bağlayıcılar ve asfalt karışımları üzerinde reolojik karakterizasyon deneyleri ve bazı mekanik testler gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, gerçekleştirilen modifikasyonun asfalt karışımlarının Marshall stabilitesi, esneklik modülü ve dolaylı çekme dayanımı özelliklerini geliştirdiğini göstermektedir. Dinamik sünme altındaki performans da çok önemli ölçüde artmıştır. Bununla birlikte, düşük sıcaklık yorulma performansında önemli iyileşmeler gözlenmemiştir. Ayrıca, nanoclay içeriğindeki artışla birlikte karışımın optimum bağlayıcı içeriği ve boşluk oranı artmıştır (Jahromi ve diğ., 2010).

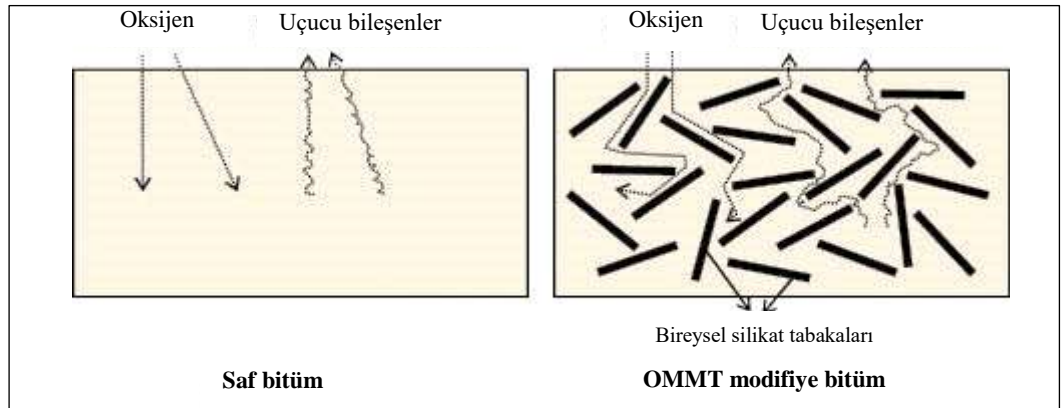
Daha önce de belirtildiği gibi, nanokilin nanokompozitlerde çok geniş bir uygulama alanı olduğu gibi özellikle “PMN” olarak adlandırılan polimer modifiye bitüm üretiminde de kullanılmaktadır. PMN üretim sürecinde, iyon değişimi organik maddeler arasında gerçekleşir; yani bitüm ve hidrofilik nanokil arasında. Araştırma sonuçları aynı zamanda malzemenin geçirgenliği azalırken, yük taşıma kapasitesinin arttığını göstermektedir (Simon ve diğ., 2008).

Asfalt modifikasyonunda polimerlerin kullanımı, son yılların en iyi yeniliklerden biri olarak kabul edilmektedir. 1980 yılında naylon-kil nanokompozitini üreten Toyota araştırmacılarının öncü çalışmaları sayesinde, o zamandan beri, modifiye katkı olarak nanokil kullanımı çok fazla ilgi görmüştür. Nanokompozitlerin üretimi amacıyla araştırılan ve matris olarak kullanılan katkı, yoğunlaştırıcı ve biyolojik olarak parçalanabilme özelliğine sahip polimerler de dahil olmak üzere çeşitli tiplerde polimerler bulunmaktadır (Zare-Shahabadi ve diğerleri, 2010b).

Bu konudaki uzlaşma, az miktarda nanokil ile modifiye edilen polimer nanokompozitlerinin geliştirilmesi üzerinedir. Bu sadece nanokilin nanoskopik seviyede dağılımı ile mümkün olmaktadır (Yang ve Tighe, 2013).

Nanokil / polimer / bitüm üçlüsünden oluşan nanokompozitlerin üretimi için genel olarak yürütülen üç farklı yaklaşım vardır; a) Yerinde polimerizasyon, b) Organik bir çözücüde çözülme ve c) Eriyik tabakalanma yaklaşımı (Galooyak ve diğerleri, 2010). Nanokompozitlerin üretiminde en yaygın kullanılan polimerlerden biri, yüksek performanslı karışımlarla sonuçlanan stiren-bütadien-stiren (SBS) kopolimeridir (Hanyu ve diğ., 2005; Fu ve diğ., 2007).

Nanokil, polimer-bitümlü bağlayıcı ile uyumluluk, yaşlanma direnci ve diğer bazı özelliklerin temini ile SBS modifiye bitüm performansını arttırmak için ikincil bir modifiye edici olarak polimerik esaslı nanokompozitlere ilave edilir. Şekil 3.4'te gösterildiği gibi, tabakalı yapı oluşumu nedeniyle, silikat tabakaları, oksijenin serbest geçişini (girişini) engeller ve aynı zamanda, modifiye bitümün uçucu bileşenlerinin buharlaşmasını yavaşlatır, dolayısıyla yaşlanmanın azalmasına neden olur.

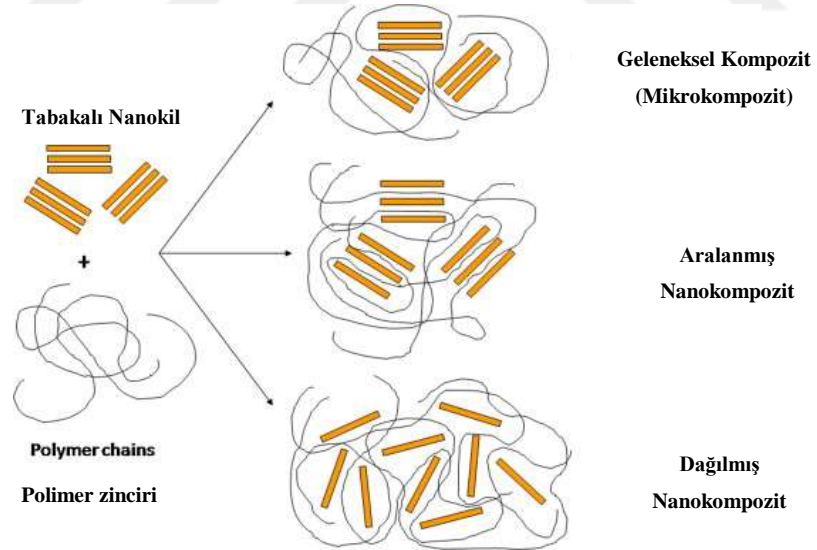


Şekil 3.4 OMMT modifiye bitümün yaşlanmayı geckettiren mekanizma (Yu ve diğ., 2009)

Sodyum aktif montmorillonit (Na-MMT) ve organofilik montmorillonit (OMMT) nanokilleri ilavesi ile asfalt kaplamalarının kalıcı deformasyonunda önemli bir azalma görülmüştür (Yu ve diğ., 2007; Polacco ve diğ., 2008; Yao ve diğ., 2012). SBS / OMMT'nin asfalt karışımları üzerindeki etkisi incelenmiş ve nano-kompozit (OMMT)

ilavesinin nanokompozitin depolama stabilitesini önemli ölçüde arttırdığı görülmüştür (Galooyak ve diğ., 2010).

Nanokompozit üretiminde uygun modifiye edici kil tipinin seçimi, polimerin kil ara katmanları arasındaki boşluklara ya interkalasyonlu ya da tabakalanmış dağılım modeline sahip olan bir optimum kompozit elde etmek açısından çok önemlidir. Şekil 3.5'te gösterildiği gibi, mikro-kompozitlerdeki tabakalı nano-killerle polimer karışımı, kil katmanları içine polimerlerin girmesine ve silikat trombositlerinin aglomera haline gelmediğine işaret etmektedir. Interkalatlı nanokompozit yapıda iken, organik bileşen paralel kil tabakaları arasına girmiştir. Tabaka aralıkları, paralel olarak kalmaya eğilimlidir ve katmanlar üzerindeki genişleme etkisine rağmen, birbirleriyle iyi tanımlanmış bir mekansal ilişki sürdürürler. Diğer yandan, pul pul tabakalanmış yapı, organik bileşenlerin doğru bir şekilde sokulmasına neden olan kesme ve difüzyonun birleşik etkisine bağlı olarak kil tabakalarının birbirinden tamamen ayrılmasına neden olur ve böylece ayrılan katmanlar organik fazın tamamına yayılır (Polacco ve diğ., 2008).



Şekil 3.5 Farklı polimerik mikro ve nanokompozit desenlerin illüstrasyonu (Peponi ve diğ., 2014)

Nano-Bentonit, mevcut çalışmada kullanılan üç katkı maddesinden biriydi. Temelde MMT ile zenginleştirilmiş bir nanokildir (Utracki, 2004). Bentonitlerde sıklıkla bulunan ek mineraller kuvars, feldispat ve zeolitlerdir. Bentonit, suyun

emilimine bağlı olarak genişlemesi açısından başlıca iki ana kategoride sınıflandırılmaktadır; Na-Bentonit ve Ca-Bentonit. Na-Bentonit, Ca-Bentonit ile karşılaştırıldığında daha fazla genişler (Santiago ve diğ., 2007).

3.4.2 Nano-Kalsiyum Karbonat (Nano-CaCO₃)

Nano-CaCO₃ temel olarak öktürölmüş Kalsiyum Karbonattan (PCC) oluşur (Hamedi ve diğ., 2015). İnorganik metalik olmayan nanomalzemeler sınıfına aittir. CaCO₃, bir asırdan fazla bir süredir asfalt karışımlarında bir katkı maddesi olarak yaygın olarak kullanılan inert bir maddedir. Bununla birlikte, uygulamalarındaki artış 1980'lerden sonra artmıştır. ABD'de Georgia, Nevada, Teksas, Virginia ve Utah'ın da bulunduğu çok sayıda devlet, asfalt kaplamalarda suya duyarlılık sorununun çözümü için CaCO₃ kullanmıştır (Epps ve Little, 2001).

CaCO₃'ün ucuza elde edilmesi ve doğada bolca bulunması, geçtiğimiz on yılda onu favori bir potansiyel bitüm modifikasyon katkısı yapmıştır. Bu nedenle, birçok araştırmacının ilgisini çekmiş ve daha fazla laboratuvar çalışması için çekici bir model mineral olarak ortaya çıkmıştır (Hao ve diğ., 2014; Politi ve diğ., 2006; Qi ve Ma, 2002; Qi ve Zhu, 2006). Dolgu maddesi olarak CaCO₃, asfalt, boya, kağıt, plastik ve kauçuk gibi farklı endüstrilerde çeşitli uygulamalara sahiptir (Dalas ve diğ., 1999).

Doğada hidrofilik bir madde olması nedeniyle, bu alanlarda CaCO₃ uygulaması sınırlı kalmıştır. Bu gerçeği dikkate alan araştırmacılar, CaCO₃ yüzeyinin, yağ asitleri ve türevleri, yüzey aktif maddelerle modifikasyona tabi tutulduğu yeni bir yöntem buldular (Ma ve diğ., 2007; Wang ve diğ., 2007). CaCO₃'ın adı geçen yüzey aktif maddelerle yüzey modifikasyonu genellikle sentez işlemi sırasında veya sonrasında gerçekleştirilir; yerinde modifikasyon ve yerinde olmayan modifikasyon süreci (Wang ve diğ., 2007).

Nano-CaCO₃, homojen partiköl büyüklüğü dağılımını, nispeten yüksek aktif yüzey alanı ve önemli ölçüde daha düşük su emilimi gibi çok sayıda kalite özelliği sergileyebilir (Henan Kingway Chemicals Co., 2014). Nano-CaCO₃ üzerinde yapılan çeşitli çalışmalar, düşük ortam sıcaklıklarında bile bitümün deforme olabilirliğini ve

yaşlanmaya karşı performansını potansiyel olarak artırabildiğini kanıtlamıştır (Yang ve Tighe, 2013).

Şu anda, nano-CaCO₃ modifiye bitümün hazırlanmasında pratik uygulamalara sahip iki farklı yöntem vardır; birinci yöntem, nano-CaCO₃'ün ısıtılmış bitüm içine doğrudan karıştırıldığı ve nano-parçaların bitüm fazında homojen olarak dağılıncaya kadar birlikte karıştırılması şeklindedir. Bu yöntem, Liu ve iş arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada benimsenmiş ve %8'lik nano-CaCO₃ ilavesinin modifiye asfalt karışımının yüksek sıcaklık performansını iyileştirdiği, bununla birlikte bitümlü bağlayıcının genel özelliklerinin önemli ölçüde değişmediği ortaya konmuştur (Liu ve diğ., 2004). İkinci yöntem, ise nano-CaCO₃'ün bir kolloidal sistem oluşturduğu uygun bir çözücünün kullanılmasıdır. Bu işlem nanoparçacıkların bitümlü bağlayıcı ile tam bir yayılımını ve uyumluluğunu sağlamak için yapılır. Ardından, elde edilen karışım bitüm ile fiziksel olarak karıştırılır (Li ve Li, 2014).

Nano-CaCO₃ üzerinde yapılan bir çalışmada, nano-CaCO₃ kullanımının granit ve asfalt bağlayıcı arasındaki aderansı önemli ölçüde artırabileceğini göstermiştir. Özellikle %7 oranında nano-CaCO₃ içeriğiyle karıştırıldığında, aderans seviyesi beş kat artmıştır. Bu çalışmadan elde edilen bir diğer sonuç ise modifiye edilmiş karışımın daldırma Marshall stabilitesinin (MSI: TSR deneyine benzer bir yöntem) kontrol karışımına göre %27 oranında arttığıdır (Hao ve diğ., 2014). Bu sonuçlar, nano-CaCO₃'ün modifiye asfalt karışımlarının neme karşı hassasiyeti açısından daha iyi performans gösterdiğine işaret etmektedir. Bir diğer çalışma, asfalt betonu AC-13 üzerinde nano-CaCO₃ etkisini değerlendirmek için yapılmıştır. Deney sonuçlarına göre, modifiye asfaltın yüksek sıcaklık performansı ve neme karşı hassasiyetini önemli ölçüde iyileştiren optimum katkı içeriğinin %6 olduğu tespit edilmiştir (Hao ve diğ., 2012).

Başka bir çalışmada nano-CaCO₃, soyulma önleyici bir katkı olarak, iki farklı agrega kaynağı olan Kireçtaşı ve Granit ile modifiye edilerek BSK üretiminde kullanılmıştır. Deney numunelerine çeşitli donma ve çözülme döngüleri altında modifiye Lottman testi uygulanmış ve serbest yüzey enerjisi yöntemleri kullanılmıştır.

Modifiye Lottman deney sonuçları, modifiye edilmiş BSK'nın dolaylı çekme mukavemetinin, numunelerin koşullandırılmış / kuru %sinin ise kontrol BSK numuneleri için olanlardan daha yüksek olduğu sonucuna varmıştır. Neme karşı duyarlılık açısından modifiye karışımın daha iyi bir performansa neden olur. Ek olarak, Yüzey Özgür Erki (Surface Free Energy – SFE) sonuçları nano-CaCO₃ ilavesinin, bitümün agrega yüzeyindeki ıslanabilirliğini arttırdığını ve aralarındaki aderansın gelişmesine neden olduğunu kanıtlamıştır. Bu artış, asit bileşeninin azalması ve modifiye bitümün SFE temel bileşeninin artmasına bağlı olarak daha iyi bir yapışma sağlar (Hamedi ve diğ., 2015).

Başka bir çalışma, kırıç eğilme reometresi (BBR) kullanılarak nano-CaCO₃ (NCC) modifiye asfaltın düşük sıcaklık performansının (termal çatlama) değerlendirilmesi amacıyla yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara dayanarak, modifikasyon, özellikle -12 °C'de düşük sıcaklık performansı açısından modifiye edilmiş bağlayıcıyı önemli ölçüde geliştirdi, bu da modifiye asfaltın termal çatlama azalmayı gösterir (Tanzadeh ve Kianfar, 2016). Bazı araştırmacılar, nano-CaCO₃'ün asfalt karışımına modifiye edici katkı olarak katılması konusuna da odaklandılar. Bu konu ile ilgili bir çalışmada iki tür nanokompozit (nano-CaCO₃ / SBS ve nano-MMT / SBS) kullanılmıştır. Her iki tip nanomalzemenin SBS'e eklenmesi ile yapılan deneysel çalışma sonuçları; kıvam (penetrasyon) ve sünekliliğin azalmasına neden olurken, yumuşama noktasını arttırdığını göstermektedir. Ayrıca nano-MMT / SBS'nin yaşlanmaya karşı performansı, nano-CaCO₃ / SBS modifiye bitüm ile karşılaştırıldığında daha iyi olmuştur (Han ve diğ., 2011).

Bir araştırma projesinde, nano-CaCO₃ ve SBS içeren bir nanokompozit üretimi amacı ile başlangıçta saf bitüm 170 °C'ye kadar ısıtılmıştır. Bitüme yüksek hızlı mikserde kesme uygulanırken sıcaklık 170 - 185 °C aralığında, kesme hızı ise 4000 - 6000 rpm arasında tutulmuştur. 1 - 1,5 saatlik karıştırma süresinden sonra nano-CaCO₃ ilavesi gerçekleştirilmiştir. Karıştırma işlemleri tekrar başlatılarak 1 saat daha 5000 - 7000 rpm'lik nispeten daha yüksek bir karıştırma hızı ile üretime devam edilmiştir. Ardından bitümlü bağlayıcı, nihai asfalt kompozit ürününü temin etmek üzere 2 saat boyunca 160 - 175 °C aralığında karıştırılmıştır (Fang ve diğ., 2013).

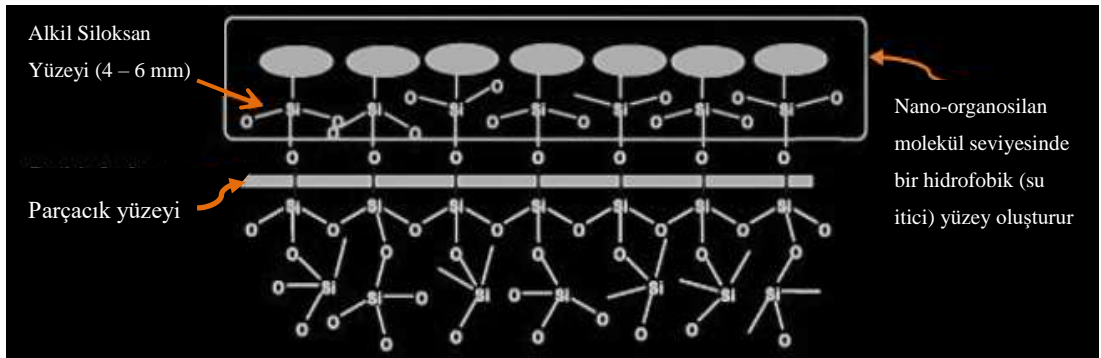
3.4.3 Nano-Organosilan (Nanoteknoloji Esaslı Soyulma Önleyici Kimyasal Katkı)

Bu çalışmada, organo-silan nanoteknoloji esaslı bir ürün, ZycoTherm®, Hindistan'da Zydex firması tarafından üretilmektedir. Nano-organosilan (ZycoTherm®), doğal olarak hidrofobik reaktif bir kimyasal üründür. Bir silan temel olarak, bitüme yatkınlığı olan bir organik zincire ve inorganik yüzeylere yatkınlığı olan bir polar ucu sahip olan bir silikon hidrit grubudur. Alkali Siloksan nano tabaka oluşumunun kendine özgü niteliği nedeniyle, modifiye edici katkı olarak kullanıldığında çok sayıda fayda sağlar.

Nano-organosilan, Zycosil ve Zycosoil gibi aynı mekanizma ile çalışır. Şekil 3.6 ve 3.7'de tasvir edildiği gibi, su seven bir agrega yüzeyini su itici bir yüzeye dönüştürerek (Zydex, 2013) agrega parçasının yüzeyinde silika ile kimyasal bir bağ oluşturan su geçirimsiz kimyasal bir sıvı olarak işlev görür.



Şekil 3.6 Nano-organosilan ilavesinden önce hidrofilik agrega yüzeyi (su seven) (Zydex, 2013)



Şekil 3.7 Agrega yüzeyini su itici hale dönüştüren nano-organosilan'ın kimyasal reaksiyonu (Mirzababaei, 2016)

Nano-organosilan'ın bir modifiye edici olarak bitüme katılması için literatürde uygulanan iki farklı yaklaşım vardır; a) nano-organosilan doğrudan belirli konsantrasyonlarda bitümlü bağlayıcıya damla damla eklenir ve tam düzgün dağılım elde edilene kadar yüksek kesme kuvveti ile karıştırılır. Sonrasında modifiye bitüm deneysel çalışmalar için hazır olacaktır, b) İkinci modifikasyon yöntemi, nano-organosilan'ı su içinde yaklaşık 1:400 oranında veya üreticilerin önerdiği şekilde seyreltmek, daha sonra da hazırlanan agrega yüzeyine uygulamaktır. Daha sonra agrega kurumaya bırakılır ve BSK üretimi için gereken karışım sıcaklığına kadar ısıtılır (İbrahim ve Mehan, 2015).

Geçtiğimiz birkaç yıl içinde, nano-organosilan'ın, asfalt karışımlarının işlenebilirliğini geliştirerek, karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarını düşürme açısından uygulanabilirliğini değerlendirmek için bazı kapsamlı laboratuvar araştırmaları yapılmıştır. Aynı zamanda, esnek kaplamaların erken yaşlarda bozulmasına neden olabilecek, dayanıklılık açısından temel problem olarak kabul edilen nem hassasiyetine karşı karışımların performansının değerlendirilmesi amaçlanmıştır.

Nano-organosilan'ın asfalt karışımlarının performansını, agrega ile bitüm arasında daha iyi bir bağ sağlayarak kaplanmasını temin etmek suretiyle geliştirebileceği iddia edilmektedir. Nano-organosilan üzerine yapılan bir çalışma, bu katkı maddesinin agrega yüzeyini kimyasal olarak değiştirdiğini ve böylece agrega ve bitüm arasında güçlü bir bağ meydana getiren moleküler seviyede bir hidrofobik bölge oluşturduğunu iddia etmektedir (Şekil 3.7). Sonuç olarak, kaplamaların hizmet ömrünü uzatabilir (Mirzababaei, 2016).

Nano-organosilan (ZycoTherm) ortam sıcaklığında sıvı halde bulunur ve genellikle ağırlıkça % 0,1 ve % 0,15 oranında bitüm ile uygulanır (Rohith ve Ranjitha, 2013). Bir çalışmada, nano-organosilan, hem granit hem de kireçtaşı içeren asfalt karışımlarının özellikleri üzerindeki etkisini değerlendirmek için soyulma önleyici katkı maddesi olarak kullanılmıştır.

Deneysel çalışma sonuçları, yorulma ömrünün agrega yüzeyi üzerinde su itici bir nano boyutlu tabaka oluşması nedeniyle uzadığını, Zycosoil dolgu miktarını arttırdı ve sıkıştırılmış asfalt karışımındaki boşluk içeriğini azalttı. Zycosoil ayrıca, inşaat sırasında asfalt karışımının nispeten daha iyi bir şekilde sıkıştırılmasını da sağlayabilir (Nejad ve diğ., 2012).

Bir başka çalışmada, BSK örneklerinin nano-organosilan (WMA katkısı olarak) içeren WMA örnekleri ile karşılaştırılmasının değerlendirilmesi amacıyla yoğun bitümlü Macadam (DBM-II) üretimi üzerinde durulmuştur. Elde edilen sonuçlar, %0,1 nano-organosilan (ZycoTherm) ile modifiye edildiğinde stabilitenin ve diğer Marshall özelliklerinin önemli ölçüde arttığı göstermektedir (Rohith ve Ranjitha, 2013).

Kumar ve diğerleri WMA örneklerinde katkı olarak %0,1 nano-organosilan içeriği kullanarak WMA ve BSK örnekleri üzerinde bir karşılaştırma yapmıştır. Sonuçlar, BSK üretiminde tüketilen yakıtın maliyetine kıyasla yakıt maliyetinde % 11-14 oranında azalma olduğunu göstermiştir. WMA serme sıcaklığı, geleneksel BSK'ya göre 20 °C düşürülmüştür (Meghana ve Kavitha, 2017).

Nano-organosilan üzerinde yapılan bir başka laboratuvar çalışmasında ise nano-organosilan'ın asfalt karışımının nem duyarlılığına karşı direncini geliştirebileceğini ortaya konmuştur. Ayrıca, tekerlek izi, yorulma ve termal çatlamaya karşı direnç de arttırabilir (İbrahim ve Mehan, 2015).

nano-organosilan ve diğer sıvı soyulma önleyici ajanların uygulanması çeşitli avantajlara sahip olsa da, aşağıda tanımlanan bazı dezavantajlara da yol açabilir:

- Muhtelif karışımların sahadaki neme bağlı olarak meydana gelen bozulmalara karşı direncin artırılmasında soyulma önleyici katkıların kullanılması ile gözlenen önemli bir değişiklik yoktur (Tohme ve diğ., 2004; Sebaaly ve diğ., 2007).

- Sıvı soyulma önleyici katkıların, asfalt karışımlarının tekerlek izi, yaşlanma ve yorulma gibi bozulmalara neden olduğunu ortaya koyan sonuçlar elde edilmiştir (Sebaaly ve diğ., 2007; Thomas ve diğ., 2006; Won ve Ho, 1994).

Nano-organosilan, bu tez kapsamında kullanılan üç katkı maddesinden biridir. Bu katkı maddesinin uygulanmasının, karışımın nem hassasiyeti ve asfalt karışımlarındaki diğer bozulmalar açısından daha iyi sonuçlar vermesi beklenmektedir.

3.5 Asfalt Modifikasyonunda Kullanılan Diğer Nanomalzemeler

3.5.1 Nano-Sönmüş Kireç

Sönmüş kireç, $\text{Ca}(\text{OH})_2$, bitümlü bağlayıcıda çözünmeyen kalsiyum tuzu oluşturmak için karboksilik asit gibi asidik bileşenlerle etkileştiğinde çok reaktif olan güçlü bir bazdır (Plancher ve diğ., 1976). Nemlendirilmiş kirlilik, asfalt endüstrisinde neme bağlı bozulma söz konusu olduğunda en çok tavsiye edilen katkı maddesidir.

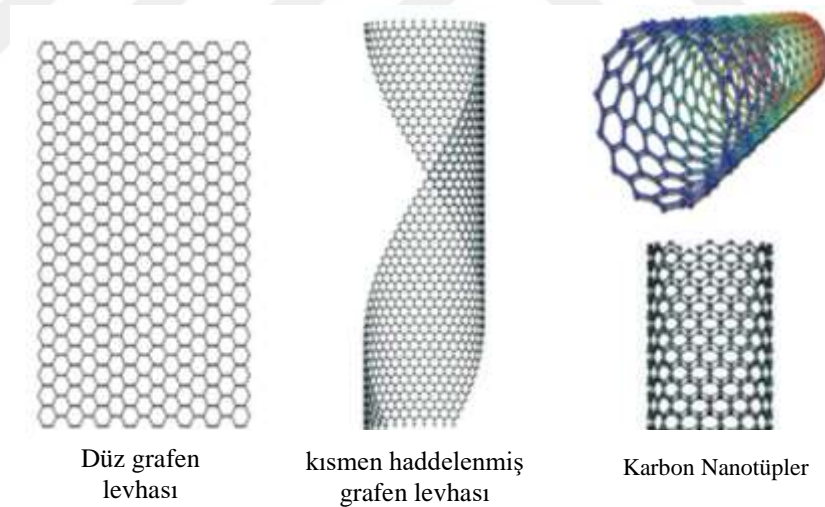
660 nm ortalama partikül boyutu ile nano boyutlu sönmüş kireç (SNHL) üretimi için başlangıçta boyut küçültme işlemi Los Angeles aşınma makinesi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Daha sonra, toz haline getirilmiş SNHL, 20 dakika süreyle sonikasyon uygulanarak asetonda çözünmüştür. Elde edilen süspansiyon daha sonra temiz bir Si alt-tabakası üzerine ilave edilerek havada kurutulmuştur. Agregaya, kirecin asfalt karışımına eklenmesi ile hemen reaksiyona girer ve bitüm ile agregaya ara yüzeyi arasındaki bağı güçlendirir. Araştırma sonuçlarına dayanarak, sönmüş kirecin soyulma problemlerine neden olan suda çözünebilir sabunların oluşumunu engellemek için yüksek polar moleküller ile etkileşime tepki göstermiştir. Bu moleküllerin sönmüş kireç ile etkileşime girmesinin bir sonucu olarak, neme karşı hassasiyet göstermeyen çözünmez tuzlar oluşturmaktadırlar (Cheng ve diğ., 2011).

Bazı çalışmalar ayrıca sönmüş kirecin, sertleşme etkilerinden, nem direncinden ve anti-oksidasyon kabiliyetinden kaynaklanan asfalt kaplamalarda meydana gelen tekerlek izine karşı koyma potansiyeline sahip olduğunu ileri sürmektedir. Sönmüş

kireç ile ilgili tüm bu nitelikler, reaktif ve etkili bir mineral dolgu maddesi olma özelliğinden kaynaklanmaktadır (Aragão ve diğ., 2010; Cheng ve diğ., 2011; Gorkem ve Sengoz, 2009; Lee ve diğ., 2010; Özen, 2011). Nano alt boyutundaki sönmüş kireç ile yapılan yeni bir çalışma, SNHL modifiye asfaltın daha yüksek ITS ve TSR değerlerine ulaştığını göstermektedir (Cheng ve diğ., 2011).

3.5.2 Karbon Nanotüpler

Karbon Nanotüp (CNT), nanoteknolojinin en yenilikçi keşiflerinden biri olarak kabul edilmektedir. İlk olarak 1991'de Iijima tarafından yüksek çözünürlüklü Transmisyon Elektron Mikroskobu (TEM) ile karakterize edilmiştir. Karbon nanotüpler, Şekil 3.8'de gösterildiği gibi tel ağını andıran ince haddelenmiş grafen tabakalarından (karbon atomlarının heksanol halkaları) oluşmuştur. Bu grafen tabakalar, 1 ila 50 nm arasında değişen bir çapa sahip içi boş silindirik tüplere dönüşür (Thomsen ve diğ., 2004; Schodek ve diğ., 2009).



Şekil 3.8 Grafen levha ve Karbon Nanotübün şeması (Amin ve diğ., 2016)

Karbon nanotüplerin üretimi için uygulanan çeşitli teknikler vardır. Bu teknikler arasında ark deşarjı, lazer ablasyonu ve kimyasal buhar biriktirme (CVD) yaygın olarak tercih edilen yaklaşımlardır. Karbon nanotüpler, yapılarını oluşturan grafen tabakalarının sayısına bağlı olarak, tek duvarlı (SWNT'ler), çift duvarlı (DWNT'ler) ve çok duvarlı (MWNT'ler) nanotüpler olarak kategorize edilir. SWNT'lerin çapı 0,4

ila 12 nm arasında değişmektedir (Monthieux, 2011; Luo ve diğ., 2013). Diğer taraftan, MWCNT yapısı, biri diğerine yakınlamış çok-haddelenmiş grafen tabakalarından oluşmaktadır. Bu grafen tabakaların sayısı muhtemelen 0,34 nm'lik bir boşluk ile 25'ten fazla duvara ulaşabilir (Ajayan, 1999). MWNT'ler, üretim açısından nispeten daha ucuz ve daha kolaydır, ancak SWNT'lerden daha az mukavemet ve sertliğe sahiptirler (Bai ve Allaoui, 2003).

Betonarme yapılar da CNT etkisinin araştırılmasına yönelik çok sayıda çalışma yapılmış, asfalt modifikasyonunda ise sadece sınırlı sayıda araştırma yapılmıştır (Amin ve diğ., 2016). Bazı araştırmacılar, bitümün reolojik özelliklerinin % 1'den fazla CNT konsantrasyonu ile modifiye edildiğinde önemli ölçüde iyileştiğini iddia etmiştir (Amirkhanian ve diğ., 2010; Amirhan ve diğ., 2011; Khattak ve diğ., 2012). CNT'ler ayrıca asfalt karışımının tekerlek izi performansının ve düşük sıcaklık çatlakları riskinin azaltılmasını sağlamaktadır (Amirkhanian ve diğ., 2010; Amirhan ve diğ., 2011). Ayrıca, asfalt modifikasyon katkısı olarak uygulanması diğer uzun vadeli kaplama performanslarını da içeren yaşlanma önleyici performansı güçlendirmiştir (Santagata ve diğ., 2012).

3.5.3 Nanosilika (*Nano-SiO₂*)

Nanosilika (NS), SiO₂ kimyasal formülüne sahip inorganik bir malzemedir. Doğada bol miktarda bulunmaktadır. Üretim açısından nispeten daha ucuz ve yüksek performans özelliklerine sahip olması nedeniyle ilaç, ilaç dağıtımı ve mühendislik alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır (Lazzara ve Milioto, 2010). Daha yüksek performans potansiyeli, yüksek yüzey alanı, güçlü adsorpsiyon, kimyasal olarak çok saf, daha iyi difüzyon kabiliyeti ve önemli stabiliteyi içeren doğal özelliklerinden kaynaklanmaktadır (Yao ve diğ., 2012). Bu niteliklere sahip olmasından ötürü, birçok araştırmacı, asfalt kaplama endüstrisinde de uygulamalarını araştırmak için ilham almıştır

Silis normal olarak bitüm ile diğer geleneksel mineral dolgu maddeleri ile etkileşime girdiğinde çok reaktiftir. Ayrıca bitüm fazında iyi bir dağılma özelliğine sahiptir. Optimum performans gösteren polimerik nanokompozitlerin üretiminde

ikincil bir katkı maddesi olarak kullanılmaya elverişlidir (LeBaron ve diğ., 1999; Ray ve Okamoto, 2003). Asfalt bağlayıcıyı modifiye etmek için % 2 ila % 4 oranlarında NS eklenmesiyle, tekerlek izi derinliğini neredeyse % 50 oranında azaltabilir (You ve diğ., 2011). Ayrıca, nano-silika ve SBS polimeri ile karıştırıldığında taş mastik asfaltın fiziksel ve mekanik özellikleri arttırılmıştır (Yu ve diğ., 2015; Zhao ve Guo, 2012). Diğer bir çalışmada nano-silika (NS) % 4 ve % 6 oranında bitüme eklenmiştir. Çalışmadan elde edilen sonuçlara göre, NS ilavesi ile tekerlek izi, yaşlanma ve yorulma çatlakları performansı açısından bitüm performansı iyileştirilmiştir (Yao ve diğ., 2012).

3.6 Asfalt Kaplamalarda Nanomalzeme ve Nanoteknoloji Uygulamalarının Sakıncaları

Nanomalzeme, asfalt kaplamaların performansını arttırmaya katkısı olan birçok doğal, olumlu ve yeni özelliklere sahip olmasına rağmen, maalesef, maliyetli üretim ve diğer bazı dezavantajlara sahiptir. Nanomalzeme uygulamalarının en olumsuz yanı, insan sağlığı açısından ultra ince nanoparçacığa maruz kalınmasıdır. İnsanların aşırı ince materyallere maruz kalması, büyük olasılıkla üç yoldan oluşur: Solunma, deri yoluyla ve yutma ile (Hoerr ve diğ., 2009) gerçekleşir. Solunma, birçok işçinin genellikle üretim ve inşaat sırasında sağlık sorunlarına maruz kaldığı, çok ince malzemelerin izlediği en yaygın yoldur (Tedja ve diğ., 2011; Tsuji ve diğ., 2005). Ultra ince mühendislik nanomalzemelerin katılması ile birlikte trafik sıkışıklığı daha da artmış olacak ve böylece işçi sağlığı açısından daha hassas hale gelecektir (Dylla ve diğ., 2012).

Nano-TiO₂, sağlık riskleri açısından tehdit edici ultra ince malzemelerden biri olmasına rağmen olumsuz etkileri hala belirsizdir (Tsuji ve diğ., 2005). Bu malzemelerin riskini azaltmak için, hem nanomalzemelerin hem de toksisite ve maruz kalma potansiyelini belirlemek gerekir (Robichaud ve diğ., 2009; Lee ve diğ., 2009).

Bir çok çalışma nano-TiO₂'in toksisite potansiyeline sahip olduğu sonucuna varmıştır (Dylla ve diğ., 2012). Örneğin, fotokatalitik bir asfalt kaplamada, işlenmiş nano-TiO₂'nin bitümlü bağlayıcıya dahil edilmesinin genellikle güneş ışığının etkisiyle

organik ve inorganik kirletici maddelerin oksitlenmesi ve ayrıştırılması amaçlanmaktadır (Fujishima ve Zhang, 2006). Bu tip kaplamalar genellikle yüksek kirlilik konsantrasyonlarına ve geniş yüzey alanları olan karayolu taşıt emisyonlarını azaltmak için inşa edilmiştir (Beeldens, 2006). Bu kaliteye sahip olmasından dolayı, kentsel kirlilik sorunlarının artışı kontrol etmek için bu tür kaplamalara olan talep artmıştır. Fotokatalitik nanopartikülleri içeren kaplamaların yapımındaki hızlı artış kaçınılmaz olarak insan maruziyetini arttırmış, böylece bu materyalleri gerektiren derinlemesine çalışmalar gereklidir (Dylla ve diğ., 2012).



BÖLÜM DÖRT

MALZEME VE YÖNTEM

Bu bölümde, çalışmada kullanılan malzemelerin özellikleri verilerek modifiye bitümlerin üretim yöntemleri açıklanmıştır. Hem bitümlü bağlayıcılar hem de asfalt karışımları üzerinde gerçekleştirilen deneysel çalışmalar ayrıntılı sonuçları ile sunulmaktadır.

4.1 Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Malzemeler

Bitüm, kireçtaşı agregası ve üç farklı modifiye edici nanomalzeme olan nano-Bentonit, nano-CaCO₃ ve nano-organosilan deneysel çalışmalarda kullanılan malzemelerdir. Bu nanomalzemeler, bitümlü bağlayıcı ve asfalt karışımlarının özellikleri üzerindeki genel etkileri görebilmek amacıyla kullanılmıştır.

4.1.1 Bitümlü Bağlayıcı

Bu çalışmada kullanılan bitümlü bağlayıcı, Türkiye Petrol Rafinerileri A.Ş.'nin (TUPRAŞ A.Ş.) Aliğa/İzmir Petrol Rafinerisinden temin edilen 50/70 penetrasyon sınıfına ait saf bitümdür. Bitümlü bağlayıcının penetrasyon sınıfının seçimi temel olarak bölgesel iklim özelliklerinin bir fonksiyonu olup, bağlayıcının kıvamını temsil eder. Yüksek iklim sıcaklığındaki bölgeler için düşük penetrasyon derecesine sahip bitümler uygun olacaktır. 50/70 penetrasyon sınıfı, Türkiye genelinde birçok bölgede yol uygulamaları için tercih edilen bitümlü bağlayıcı sınıfıdır.

Deneysel çalışmalar ilgili standartlara uygun olarak bitümlü bağlayıcı üzerinde gerçekleştirilmiş olup, 50/70 penetrasyonlu bitüm özellikleri özet halinde Tablo 4.1'de sunulmuştur.

4.1.2 Agregalar

Asfalt karışımlarında kullanılan agregalar Dere Grup A.Ş. / Belkahve İzmir ocağından temin edilen kırmataş kireçtaşı agregasıdır. Esnek kaplamalar için T.C.

Karayolları Teknik Şartnamesi Tip-1 aşınma tabakası gradasyonuna uygun olarak yoğun gradasyonlu agrega kullanılmıştır.

Tablo 4.1 50/70 penetrasyon sınıflı saf bitümün özellikleri

Deney adı	Sonuç	Şartname Limitleri	Standart
Penetrasyon (25°C; 1/10 mm)	64	50 - 70	ASTM D5-06/ EN 1426
Yumuşama noktası (°C)	51,5	46 - 54	ASTM D36-06/ EN 1427
Viskozite (mPa.s, 135°C)	425	3000 mPa.s (maks.)	ASTM D4402-06
Viskozite (mPa.s, 165°C)	138	-	ASTM D4402-06
RTFOT Yaşlanma Sonrası Performans (ASTM D2872-12)			
Kütle değişimi (%)	0,08	0,5 (maks.)	
Kalıcı Penetrasyon (orijinalin %'si)	60,9	50 (min.)	ASTM D5 EN 1426
Yumuşama Noktasındaki Artış	5,7	9 (maks.)	TS EN 12607-1
Parlama noktası (°C)	+260	230 (min.)	ASTM D92 EN 22592
Özgül ağırlığı	1,03	-	ASTM D70

Deneysel çalışmalar, Dokuz Eylül Üniversitesi Prof. Dr. Mehmet Uluçaylı Yol Malzemeleri Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Laboratuvarda asfalt karışımlarının hazırlanmasında kullanılan agregaların fiziksel özellikleri ve gradasyonu sırasıyla Tablo 4.2 ve 4.3'te verilmiştir.

Kireçtaşı, granit ve bazalt gibi inert agregalar yol yapımında yaygın olarak kullanılan agregalardır. Genel olarak, kireçtaşı gibi yüksek karbonat içeriğine sahip agregaların, yüksek silika muhtevasına sahip olan agregalara kıyasla bitümlü bağlayıcı ile kaplanması nispeten daha kolaydır. Bu durum, silisli agregaların, karboksilik asit ve su için daha yüksek afinite ile yüksek konsantrasyonlarda hidroksil grupları içermesinden kaynaklanmaktadır. Bu nedenle, bu agregaların kireçtaşı agregalarına (hidrofobik) göre soyulmaya karşı (hidrofilik) daha duyarlı oldukları düşünülmektedir (Hicks, 1991; Stuart, 1990; ve Whiteoak, 2015).

Bitümlü bağlayıcı, zıt iyonik yükler birbirini çektiğinden, örneğin kireç taşı gibi alkali (bazik) agregaya daha iyi yapışma eğilimindedir. Öte yandan, silisli agregalar, asidik yapıda olmaları nedeni ile bitümlü bağlayıcının agrega yüzeyine daha az

tutunabilir olmasına neden olur (Curtis ve diğ., 1993). Bu nedenle, adezyon başarısı için kireçtaşı agregaları yaygın olarak tercih edilir. Bu özelliği nedeni ile nem direncine karşı nispeten daha iyi performans gösterecektir (Airey ve diğ., 2008).

Tablo 4.2 Kireçtaşının fiziksel özellikleri

Test	Değerler	Şartname Limitleri	
		(Aşınma Tip-1)	
			Standart
Özgül Ağırlık (Kaba Agreg)			ASTM C127-07
• Hacim	2,694	-	
• Kuru Yüzey Doygun	2,701	-	
• Zahirî	2,734	-	
Özgül Ağırlık (İnce Agreg)			ASTM C128-07
• Hacim	2,695	-	
• Kuru Yüzey Doygun	2,703	-	
• Zahirî	2,737	-	
Özgül Ağırlık (Filler)			-
Los Angeles Aşınması (%)	24,4	45 (maks.)	ASTM C1252-06
Yassılık İndeksi (%)	7,5	10 (maks.)	ASTM D4791-10
Sağlamlık Yüzdesi (%)	1,47	10-20 (maks.)	ASTM C88-05
İnce Agreganın Köşeliliği	47,85	40 (min.)	ASTM C1252-06

Tablo 4.3 Kireçtaşı agreganın gradasyonu (Aşınma Tip-1)

Elek No	Geçen (%)	Şartname Limitleri	
		Min.	Maks.
3/4"	100	0	100
1/2"	92	88	100
3/8"	73	72	90
No.4	44,2	42	52
No.10	31	25	35
No.40	12	10	20
No.80	8	7	14
No.200	5,3	3	8

4.1.3 Nano-Boyutlu Malzemeler

Bu araştırmada bitümün özelliklerini modifiye etmek için üç farklı tipte nanomalzeme kullanılmıştır. Üretilen modifiye bitümlerle hazırlanan asfalt karışımlarının performansının iyileştirilmesi beklenmektedir. Nano malzemeler;

nano-Bentonit (nanokil), nano-CaCO₃ ve nano-organosilan dir. İlk iki modifiye edici esas olarak toz halinde (nano-dolgu) iken, nano-organosilan sıvı bir soyulma önleyici katkı maddesidir. Bu katkıları, bitümlü bağlayıcıyı nano seviyede modifiye ederler.

4.1.3.1 Nano-Bentonit Kili

Bentonit, temel olarak, smektitler grubuna ait tipik bir 2:1 katmanlı yapıda ve yüksek konsantrasyonda sodyum iyonlarına sahip olan kil minerallerinin büyük bir kısmını içeren bir tortul kayadır (Santiago ve diğerleri, 2007). Aslında Bentonit, başlıca montmorillonit bileşenlerinden oluşan bir kil mineralidir (Utracki, 2004).

Bentonitin özellikleri, iki tetrahedral silika levhası arasındaki bir oktahedral alümina tabakası olan smektit grubunun kristal yapısından türetilmiştir (Adams ve Williams, 2005). Bentonit, ismini ilk bulunduğu yer olan Fort Benton (Wyoming, ABD) dan almıştır. Bentonit kili, montmorillonite ile birlikte feldspat, biyotit, kaolinit, illit, kristobalit, piroksen, zirkon ve kristalin kuvars içerebilir (Parkes, 1982). Bentonit, dokunulduğunda yağlı ve sabun gibi bir his verir (Jackson ve Bates, 1987). Kaynağından çıkarılan Bentonit, beyaz ile soluk yeşil yada yeşil ile mavi renklerde dir. Zamanla karararak sarı, kırmızı veya kahverengi renklerini alır (Parker, 1988).

Bentonitin ait özellikler; suyla birlikte tiksotropik jeller oluşturma kabiliyeti, büyük miktarlarda suyu emebilme yeteneği ile birlikte, kuru hacmine oranla 12–15 kat hacim artışı gösterebilme ve yüksek bir katyon değişim kapasitesine sahip olmasıdır (Bilal ve diğ., 2016).

Bu çalışmada kullanılan nano-Bentonit'in (Şekil 4.1) saf bitümü modifiye etmesi ve genel performansını iyileştirmesi amaçlanmıştır. ESAN Eczacıbaşı A.Ş.'den temin edilen Bentonitin özellikleri sırasıyla Tablo 4.4 ve 4.5'te verilmiştir.

Tablo 4.4 Nano-Bentonit'in kimyasal analizi (%)

İçerik	AZ. (L.o.I.)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O
(%)	6,50 ± 1,00	72,00 ± 2,00	14,00 ± 1,00	1,80 ± 0,20	0,20 ± 0,10	2,50 ± 0,50	2,30 ± 0,50	1,00 ± 0,50	0,80 ± 0,50

Tablo 4.5 Nano-Bentonit'in fiziksel özellikleri

Katyon değişim kapasitesi	(meq/100 gr)	85,0 ± 5,0
Şişme	(ml/2 gr)	12,0 ± 2,0
Sedimentasyon (72 saat)	(ml)	15,0 ± 5,0
Sinterleşme noktası	(°C)	1200
Yığın yoğunluğu	(gr/lt)	800 ± 30
Topaklanma testi		Pozitif
Topak ağırlığı	(gr)	55 ± 5
Su emme	(%)	90 ± 5
Su emme süresi	(saniye)	65 (maks.)
Ağartma-Orijinal	Tonsil Eşdeğeri	0,6
Ağartma-Asit aktive		0,75
pH (8% katı)		8,5
Grit içeriği (+75 mm)	(%)	<4
Renk		Beyaz
Açıklık-Koyuluk		94,0 ± 1,0
Rutubet/Nem	(%)	<30
Montmorillonit	(%)	85 (min.)
Kristobalit -Opal C	(%)	15 (maks.)
Plajiolaz	(%)	Trace



Şekil 4.1 Nano-Bentonit (Kişisel arşiv, 2017)

4.1.3.2 Nano Kalsiyum Karbonat (Nano-CaCO₃)

Kalsiyum karbonat (CaCO₃) nano parçacıklar, nanodotlar veya nanotozlar, kübik yada altıgen şekilli yüksek yüzey alanına sahip parçacıklarıdır. Nano ölçekte kalsiyum karbonat parçacıkları tipik olarak 10-80 nanometre (nm) boyutlarında ve özgül yüzey alanı (SSA) 30-60 m²/g (American Elements, bt) aralığındadır.

Bu araştırmada kullanılan CaCO₃ nanoparçacıklar, Şekil 4.2'de gösterilen fiziksel görünümüne sahip olup nano boyutta üretilmiştir. Daha yüksek yüzey alanı/hacim oranına sahiptir. Bitüm sürekli fazında homojen olarak dağılabilir ve bitüme mikro ölçeklerdeki katkı maddelerine kıyasla nispeten çok daha düşük oranlarda eklenir.

Tez çalışmasında bu tür bir nanomalzemenin kullanılmasının amacı, modifiye edilmiş asfaltın genel performansının ve özellikle sıklıkla gözlenen problemlerden, suya karşı hassasiyetin giderilmesi ve yüksek sıcaklık koşullarında daha iyi stabilite sağlamaktır.

Bu çalışmada kullanılan nano-CaCO₃ CAN-6607 Ürün Nosu ile Guangdong Qiangda New Materials Technology Co., Ltd. (Çin) tarafından üretilmiştir. Nano-CaCO₃'ün özellikleri Tablo 4.6'da verilmiştir.

Tablo 4.6 Nano-CaCO₃ 'ın genel özellikleri

CaCO ₃ % ≥	98
Parçacık boyutu	60-80 nm
pH	8,0-10,0
Gerçek yoğunluk (g/cm ³)	2,5-2,6
Hacimsel yoğunluk g/ml	0,68
Nem % ≤	0,3
Beyazlık % ≥	96
Etkin oranı %	95
Görünüş	Beyaz toz



Şekil 4.2 Nano-CaCO₃ (Kişisel arşiv, 2017)

4.1.3.3 Nano-Organosilan Soyulma Önleyici Nanoteknoloji Katkısı

Bu çalışmada kullanılan nano-organosilan ürünü ZycoTherm®, Hindistan'daki Zydex firması tarafından üretilen organo-silan esaslı bir üründür. Adezyon artırıcı olarak tasarlanmış olması yanında, sıcak karışım asfalt kaplamaların özelliklerinin iyileştirilmesi ve işlenebilirlik artışı sağlama özellikleri de bulunmaktadır. Nano-organosilan, doğal olarak hidrofobik bir organo-silan nanoteknoloji ürünü olup reaktif kimyasal esastır. Bir silan temel olarak, bitüme yatkınlığı olan bir organik zincire ve inorganik yüzeylere yatkınlığı olan bir polar ucu sahip olan bir silikon hidrit grubudur. Organo-fonksiyonel silanlar, bir silanol elde etmek için suyun varlığında hidroliz yoluyla hareket ederler; bu inorganik uc silisli agreganın yüzeyi ile reaksiyona girerken, bitüm içinde çözülmüş kalan bir lipofilik parça ile bir siloksan yapısını oluşturmak üzere hızla yoğunlaşarak bir silanole dönüşür (Bagampadde ve diğ., 2004).

Nano-organosilan temel olarak kokusuz, soluk sarı renkli bir katkıdır (Şekil 4.3). Asfaltın neme karşı hassasiyeti azaltır, karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarını düşürür. Bir soyulma önleyici gibi katkı olduğu kadar ılık karışım asfalt katkısı olarak işlev görmesini sağlayan ikili bir fonksiyona sahiptir. Bu katkı maddesi, polimer modifiye

bitümler ve atık lastik katkı ile modifiye edilmiş bitümlü bağlayıcılar dahil olmak üzere her tip modifiye bitüm ve saf bitümlü bağlayıcılar ile genel olarak uyumludur. Bağlayıcı sınıflandırmasını etkilemez ve diğer herhangi bir bağlayıcı özelliğini değiştirmez. Nano-organosilan (ZycoTherm), oda sıcaklığında sıvı kimyasal bir ürün olarak tanımlanır ve ağırlıkça % 0,1 ve % 0,15 oranında bitümlü bağlayıcıya ilave edilir (Rohith ve Ranjitha, 2013).

Bu tez çalışmasında, nano-organosilan doğrudan bitüm bağlayıcıya eklenerek modifiye edilmiş bitümlü bağlayıcının özelliklerinin belirlenmesi ve sonrasında bu modifiye bitüm ile asfalt karışımları üretilerek asfalt karışımlarının genel performansındaki değişimlerin incelenmesi amaçlanmıştır. Nano-organosilan'ın fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 4.7'de sunulmuştur.

Tablo 4.7 Nano-organosilan (ZycoTherm) 'in fiziksel ve kimyasal özellikleri (Zydex, 2013)

İçindekiler	Fiziksel durum	Renk	Koku	Viskozite	Özgül ağırlığı	Parlama noktası	Çözünürlük Su
Hidroksialkil alkoksialkilsil bileşikleri, Benzil Alkol, Etilen Glikol	Sıvı	Ayva sarısı (Şekil 4.3)	Kokusuz	1-5 Pa.s	25°C'de 1,01	>80°C (176°F)	Su ile karışabilir



Şekil 4.3 Nano-organosilan (ZycoTherm®) soyulma önleyici katkı (Kişisel arşiv, 2017)

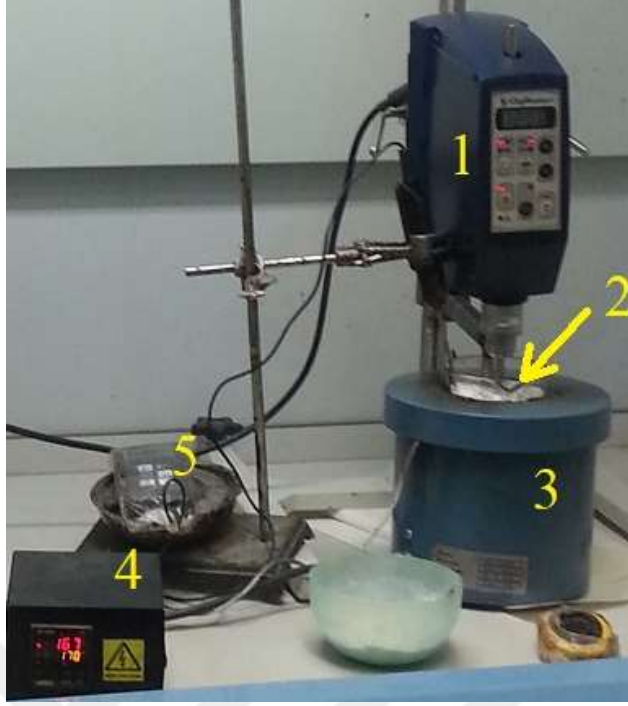
4.2 Deneysel Çalışmalar

Bu bölümde öncelikle modifiye edilmiş bitümlü bağlayıcıların üretimi ile ilgili bilgiler verildikten sonra hazırlanan bitüm numuneleri üzerinde uygulanan geleneksel ve reolojik deneyler kapsamlı olarak incelenecektir. Ayrıca üretilen bitüm numuneler ile hazırlanan karışımlar üzerinde mekanik deneylerde ele alınacaktır.

4.2.1 Modifiye Bitüm Üretimi

Fiziksel karıştırma yöntemi ile nano-malzeme katkılı modifiye bitüm üretmek için katkılar doğrudan bitüm bağlayıcıya eklenmiştir. Bu çalışmada modifikasyon amacıyla 3 farklı tip nanomalzeme kullanılmıştır. Bunlar; Bentonit nanokili (nano-Bentonit), nano-CaCO₃ ve nano-organosilan nanoteknolojik soyulma önleyicidir. Her üç modifikasyon katkısı için modifikasyon yöntemleri, katkı oranları, karışım koşulları, karıştırma sıcaklığı ve karıştırma hızları birbirinden farklı olup, konu ile ilgili literatür ve üretici firma tarafından önerildiği şekli ile modifiye bitümler üretilmiştir. Modifikasyon katkıları farklı karışım oranlarında bitüme eklenerek her katkı maddesi için optimum modifiye edici içerikleri belirlenmiştir.

Nanomalzemelerle modifiye bitüm üretmek için laboratuvar tipi yüksek hızlı kesme mikseri kullanılmıştır. Yüksek hızlı kesme mikseri, nanoparçacıkların etkili bir kayma gerilmesine uğrayarak bitüm matrisi içinde homojen olarak dağılması açısından çok etkilidir. Mikser pervanesi ucunun özel tasarımı, yüksek hızlı kesme mikserini (HSM) diğer laboratuvar tipi mikserlerden farklı kılar. Yüksek hızlı kesme mikserleri, yüksek kesme hızı sağlarken düşük pompalama ve sirkülasyon seviyelerini bir arada sunar (Amin ve diğerleri, 2016). Yüksek dönme hızı malzemeleri kabın dibinden yukarıya doğru çekerken, merkezkaç kuvveti malzemenin hızlı bir şekilde statora doğru yönlendirerek karışımın düşük hızlı bölgesine yönlendirir. Karıştırma hızı, homojen olarak karıştırılmış modifiye bitüm üretimi için bir hidrolik kesme kuvveti oluşturur (Silverson, 2017). Bu çalışmada kullanılan yüksek hızlı kesme mikseri Şekil 4.4'te gösterilmiştir.



Şekil 4.4 Yüksek hızlı kesme mikseri(Kişisel arşiv, 2017)

1. Yüksek hızlı kesme mikseri
2. Numune içeren beher
3. Sıcaklık hücresi
4. Dijital termostat
5. Dijital termometre

4.2.1.1 Nano-Bentonit Katkılı Modifiye Bitüm Üretimi

Nano-Bentonit, saf bitüme ağırlıkça %2, %4 ve %6'lık oranlarda eklenmiştir. Öncelikle laboratuarda cam behere dökülen saf bitümlü bağlayıcı, 170 ± 5 °C'ye kadar bir etüvde ısıtılarak sıcaklığı sabit tutan sıcaklık hücresine (thermo couple) yerleştirilmiştir. Yüksek hızlı kesme mikseri ve sıcaklık hücresi Şekil 4.4'te gösterildiği gibi konumlandırılmıştır. Mikserin başlangıç dönme hızı, bağlayıcının kaba dökülmesi sırasında oluşan hava kabarcıklarından kurtulmak ve katkı ekleme işlemi sırasında oluşacak sıçramayı önlemek için 1000 rpm (devir/dakika) olarak uygulanmıştır. Nano-Bentonit, saf bitüme mikser çalışırken yaklaşık olarak 1 gr/dak hızında ilave edilmiştir. Mikserin dönme hızı, nano-Bentonit ilavesinin tamamlanmasından hemen sonra 2000 rpm'e kadar arttırılmış ve bitüm matrisinde

nanoparçacıkların yeteri kadar dağılmasını sağlamak ve homojen bir karışım elde etmek amacıyla 1 saat boyunca devam ettirilmiştir.

4.2.1.2 Nano-CaCO₃ Katkılı Modifiye Bitüm Üretimi

50/70 penetrasyon sınıfına ait saf bitüm 160 ± 5 °C'ye kadar ısıtıldıktan sonra nano-CaCO₃, saf bitüme %3, %6 ve %9 oranlarında eklenmiştir. Yüksek hızlı kesme mikserinde dönüş hızı 2500 rpm'de iken nano-CaCO₃ 2 ila 4 gr/dak da bitüme topaklanma oluşmaması için yavaş yavaş eklenmiştir. Nano-CaCO₃ elavesi sonrasında mikserin kesme hızı 3000 rpm'ye yükseltilmiş ve homojen bir dağılım sağlamak için yarım saat daha karıştırmaya devam edilmiştir. Numune daha sonra olgunluk temini amacı ile 24 ± 1 saat süreyle 100 ± 5 °C'deki etüvde bekletilmiştir. Daha sonra, numune tekrar 160 ± 5 °C'ye ısıtılarak 20 dakika süreyle 3000 rpm'de karıştırılmıştır.

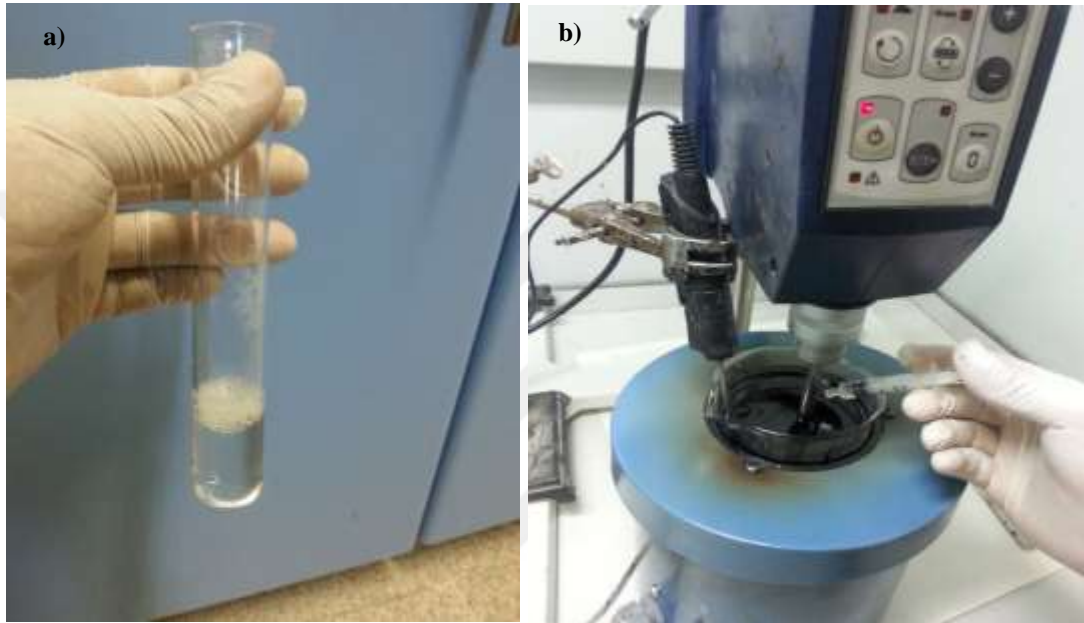
4.2.1.3 Nano-organosilan Katkılı Modifiye Bitüm Üretimi

Nano-organosilan laboratuvar kontrol kılavuzuna (Zydex, 2012) göre, havaya ve neme uzun süre maruz kalmak, Nano-organosilan numunesinin etkinliğini olumsuz yönde etkileyebilir. Bu nedenle numunenin kullanılabilirliğinden emin olmak için kalite kontrolü yapılır. Bunun için 1 ml Nano-organosilan örneği, bir laboratuvar tüpünde 10 ml içme suyunda seyreltilir. Çalkalama işleminden sonra, ürünün solüsyonu bulanıklıktan arınmış veya saydamsa, ürünün bitüm modifikasyonu için uygun olduğu kabul edilir (Şekil 4.5a). Solüsyon beyazımsı veya bulanık bir renk alırsa, örnek bozulduğu kabul edilir.

Nano-organosilan genellikle çok düşük dozlarda bitüme eklenir. Bu çalışmada dikkate alınan kullanım oranları bitüm ağırlığına % 0,1, % 0,2 ve % 0,3'tür. Saf bitüm numunesi bir fırında 150 ± 5 °C'ye ısıtılarak, nano-organosilan Şekil 4.5b'de gösterildiği gibi 1 ml veya 5 ml'lik şırınga yardımıyla damla damla bitüme eklenmiştir. Nano-organosilan'ın yoğunluğu yaklaşık 1,0 olduğu için, gram ve mililitreler aynı miktarda malzemeye karşılık gelir. Nano-organosilan ilavesi sırasında, 150 ± 5 °C'ye ısıtılan bitüm örneği, 1000 rpm sabit hızda karıştırıldığı sırada nano-organosilan

bitüme yavaş yavaş ilave edildikten sonra, 1000 rpm sabit hızda karıştırma işlemine 10 dakika daha devam edilmiştir. Böylece nano-organosilan'ın bitümlü bağlayıcı ile homojen olarak karıştırılarak iyileştirilmesi temin edilmiştir.

Tablo 4.8'de nanomodifiye edilmiş bitüm numunelerin üretilmesi için uygulanan koşullar özetlenmiştir.



Şekil 4.5 a) Şeffaf nano-organosilan çözeltisi, b) Bitüme nano-organosilan'ın eklenmesi (Kişisel arşiv, 2017)

Tablo 4.8 Nanomalzemeleri içeren bitüm numunelerin üretim koşulları

Katkı	İçerik (%)	Üretim Sıcaklığı (°C)	Mikser Hızı (rpm)	Üretim Süresi
Nano-Bentonit	2	170	1000 - 2000	60 dk.
	4			
	6			
Nano-CaCO ₃	3	160	2500 - 3000	30 dk. + 20 dk. (24 saat 100°C'lik etüvde beklettikten sonra)
	6			
	9			
Nano-organosilan	0,1	150	900 - 1100	10 dk.
	0,2			
	0,3			

4.2.2 Nanomalzemelerle Modifiye Edilmiş Bitümlü Bağlayıcılarda Mikroskopi Çalışmaları

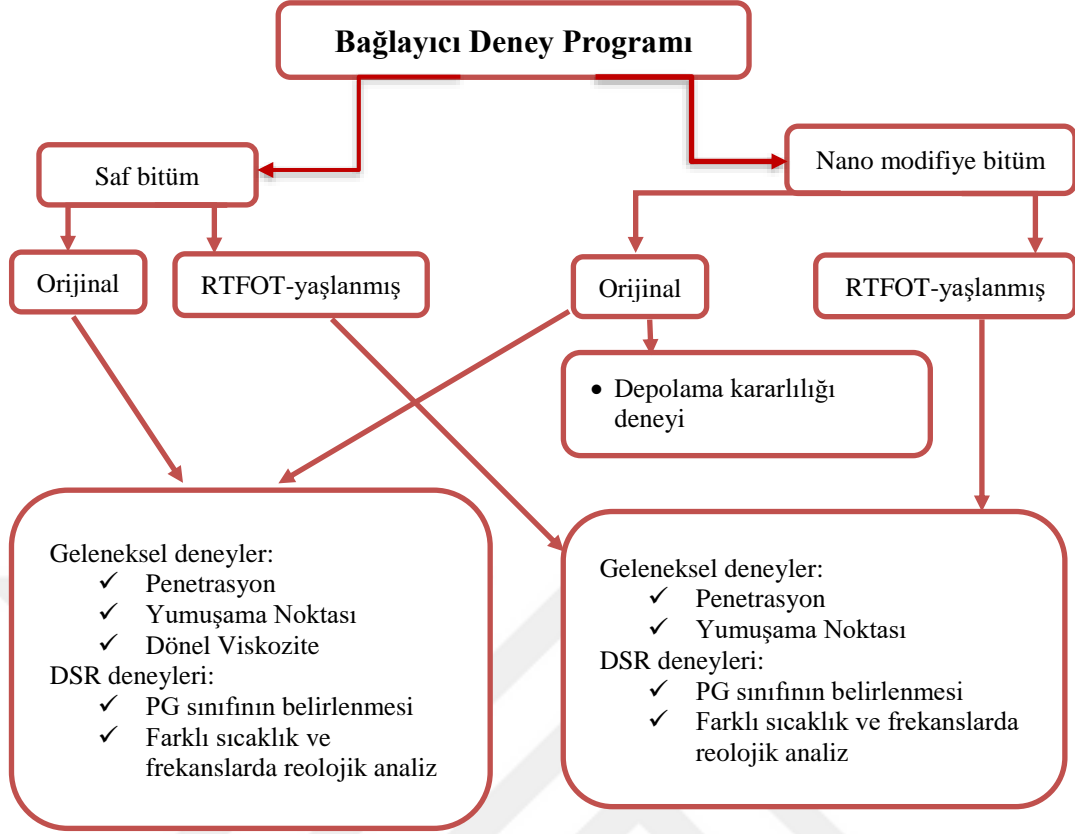
Olympus BX43 floresan mikroskop nanomalzemelerin bitüm üzerindeki morfolojik etkilerini gözlemek için kullanılmıştır (Şekil 4.6). Katkıların bitüm matrisindeki dağılımı, tüm örnekler için mikro ölçekte görüntülenmiştir. Bitüm fazında dağıtılmış nano boyutlu parçacıklar açıkça ayırt edilmektedir. Çalışmalar, nanomalzemelerin uygun bir şekilde üretildiğinde bitüm fazında daha iyi dağılma kabiliyetine sahip olduklarını göstermektedir. Nano-silika üzerine yapılan bir çalışmada kompozit malzemelerde iyi dispersiyonun yüksek stabiliteye neden olabileceği gösterilmiştir (Yao ve diğ., 2012; He ve Shi, 2008).



Şekil 4.6 Olympus BX43 floresan mikroskobu (Kişisel arşiv, 2017)

4.2.3 Bitümlü Bağlayıcı Deneyleri

Bitümlü bağlayıcılar üzerinde uygulanan deneysel prosedürü Şekil 4.7'deki akış şemasında gösterildiği gibidir.



Şekil 4.7 Bitümlü bağlayıcılara uygulanan deneylere ait akış şeması

4.2.3.1 Penetrasyon Deneyi (ASTM D5, AASHTO T49)

Bitümlü bağlayıcıların sertlik veya kıvamlılığını belirlemek için kullanılan bir deneştir. ASTM D5 veya AASHTO T49 standartlarına uygun olarak, 25 °C (77 °F) sıcaklıkta, standart bir iğnenin belirli bir yük altında (100 g) ve sürede (5 sn) bitümlü bağlayıcı örneği yüzeyinden düşey olarak battığı derinlik ölçülür. İğnenin penetrasyon derinliği milimetrenin onda biri cinsinden ifade edilir (örneğin iğne 8 mm derinliğe ulaşırsa, asfaltın penetrasyon değeri 80'dir) (Şekil 4.8). Penetrasyon değeri kıvamlilikla ters orantılıdır. Penetrasyon değeri yükseldikçe bitüm yumuşar.

Penetrasyon sınıflandırması penetrasyon deneyine dayanır ve bağlayıcı örneğinin sertliği ile ortam sıcaklığının bir fonksiyonudur (Pavement Interactive, 2012a).



Şekil 4.8 Penetrasyon deney aleti (Kişisel arşiv, 2017)

4.2.3.2 Yumuşama Noktası Deneyi (ASTM D 36, AASHTO T 53)

Yumuşama noktası deneyi ASTM D 36 ve AASHTO T 53 standartlarına uygun olarak gerçekleştirilir. Bu testin amacı, bitümlü bağlayıcıların sıcaklığa karşı duyarlılığını ölçmektir (hangi sıcaklıkta bitümün akmaya başladığı). Yüzük-bilya yöntemi ile yumuşama noktası olarak ifade edilen sıcaklık değeri belirlenerek servis ömründe akmadan dayanabileceği en yüksek sıcaklık değeri belirlenir. Yumuşama noktası çok yüksek bitümlerin viskozitesi de yüksek olduğundan, sıcak karışım yapım sıcaklıkları da yüksek olmaktadır.

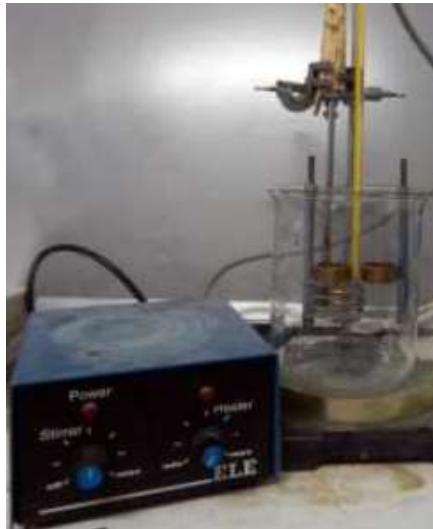
Bitümlü bağlayıcılar, kaynağına bağlı olarak farklı yumuşama noktalarına sahip viskoelastik malzemelerdir. Sıcaklık arttığında giderek daha yumuşak ve daha az viskoz hale gelirler. Bu nedenle, sonuçların tekrarlanabilir olması açısından yumuşama noktasını tanımlanmış standart bir yöntemle belirlemek gerekir.

Yumuşama noktası, bir bitüm örneğinin 3,5 gram ağırlığındaki çelik bilyenin ağırlığını taşıyamadığı sıcaklık değeri olarak tanımlanır (Şekil 4.9). Bu deney sürecinde, iki ayrı pirinç halka içine dökülen bitüm örnekleri üzerine 3,5 gram ağırlığındaki çelik bilye konularak bir sıvı banyosunda (banyo ortamı olarak 80 °C'nin üzerinde yumuşama noktasına sahip bağlayıcılar için gliserol daha düşük yumuşama

noktası değerleri için damıtılmış veya içilebilir su kullanılabilir) ilk 3 dakika 5°C sabit, sonra dakikada 5°C artacak şekilde kontrollü bir hızda ısıtılır. Yumuşama noktası, iki ayrı pirinç yüzük içindeki bitüm örnekleri üzerindeki bilyanın 25 mm [1,0 inç] mesafede bitümle etrafı sarılı bir şekilde düşmesine izin verecek kadar yumuşadığı sıcaklık değerlerinin ortalaması olarak belirlenir. Genel olarak, daha yüksek yumuşama noktası değerine sahip olan bir bitümlü bağlayıcı, sıcaklığa karşı daha düşük duyarlılık göstereceğinden, sıcak iklimlerde kullanılması tercih edilir. şekil 4.10'da Ring & Ball (yüzük ve bilya) deneyi olarak da adlandırılan yumuşama noktası deneyinin yapılışı gösterilmektedir.



şekil 4.9 Yumuşama noktası örneği (pirinç halkaya yerleştirilerek üzere çelik bilye konulmuş) (Pavement Interactive, 2012b)



şekil 4.10 Yumuşama noktası deneyi cihazı (Kişisel arşiv, 2017)

4.2.3.3 Brookfield Dönel Viskozite Deneyi (ASTM D4402, AASHTO T 316)

Bitümlerin işlenebilirliğini tespit etmek (karıştırma, sıkıştırma, pompalama ve doldurma, boşaltma sırasındaki akışkanlık özelliğini belirlemek) için Brookfield dönel viskozimetre aleti kullanılır. Ayrıca sıcak karışımların karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları da viskoziteye bağlı olarak bulunur. Asfaltın viskozitesinin 170 ± 20 santistok olduğu sıcaklık karıştırma sıcaklığı ve viskozitesinin 280 ± 30 santistok olduğu sıcaklık ise sıkıştırma sıcaklığı olarak belirlenir.

Uygulanan kesme gerilmesi ile kesme hızı arasındaki oran, viskozite katsayısı olarak adlandırılır. Bu katsayı, sıvının akmaya karşı direncinin bir ölçüsüdür. Başka bir deyişle, viskozite akışkanlıkla ters orantılıdır. Viskozitenin SI birimi Paskal saniye (Pa.s) 'dir.

Bitümün yüksek viskozite değerleri, silindirin sıkıştırmasına karşı direnç nedeniyle genel olarak heterojen bir karışıma neden olabilir. Sonuç olarak karışım düşük bir yoğunlukta sıkıştırıldığından, düşük stabiliteye sahip kaplama şeridi elde edilir. Aynı zamanda, bağlayıcının daha yüksek viskozitesi nedeniyle homojen bir karışım için plentteki üretim veya karıştırma sıcaklıklarının da daha yüksek olması gerektiğinden, fazladan harcanacak enerji nedeni ile ekonomik bir karışım yapılamayacaktır. Diğer yandan, bitümlü bağlayıcının daha düşük viskoziteye sahip olması, agrega çevresini saran film kalınlığının ince olmasına neden olacağından, karışımın kalıcılığını olumsuz yönde etkileyecektir (Suryakanta, 2015).

Yaşlanmamış saf ve nanomodifiye bitüm örnekleri üzerinde dönel viskozite deneyi Brookfield Dönel Viskozite cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Dönel viskozite deneyi, asfalt bağlayıcının pompalama ve karıştırma için yeterince sıvı olup olmadığının anlaşılmasına yardımcı olur (Roberts ve diğerleri, 1991). Şekil 4.11'de dönel viskozite deney aleti ve numune kapları görülmektedir.

Temel RV testi, termostatik olarak kontrol edilen bir numune kabının içine yerleştirilen bitüm örneğine daldırılan bir silindirik milin sabit bir dönme hızını (20

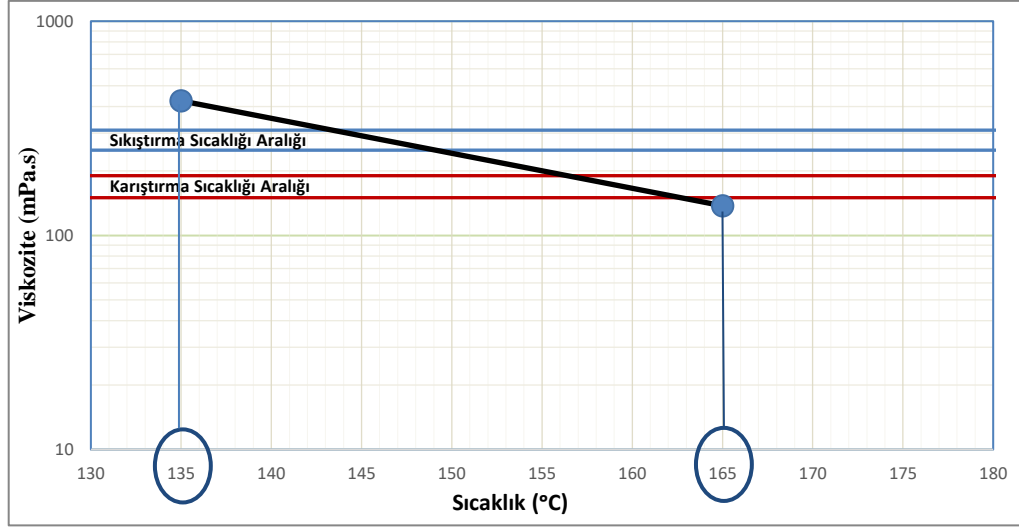
rpm) muhafaza etmek için gereken torku ölçer. Elde edilen tork değeri dinamik viskoziteye dönüştürülerek dönel viskozimetre yazılımında otomatik olarak gösterilir (Pavement Interactive, 2012c). Tork, bitümün Pascal saniye (Pa.s), milipaskal saniye (mPa.s) veya santipoaz (cP) cinsinden viskozitesini belirlemek için kullanılır. Bu deney yönteminin detayı AASHTO T 316 ve ASTM D 4402 standartlarında tanımlanmıştır.



Şekil 4.11 Dönel viskozite deney cihazı ve numune kapları (Kişisel arşiv, 2017)

4.2.3.4 Karıştırma ve Sıkıştırma Sıcaklıklarının Belirlenmesi

Asfalt Enstitüsü, BSK karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarının belirlenebilmesi amacıyla eşdeğer sıcaklık aralıklarının oluşturulması için dönel viskozimetre kullanılmasını önermektedir. Modifiye edilmiş ve saf bitüm örnekleri, 135 °C ve 165 °C'lik sıcaklıklarda viskozite testine tabi tutulur. Toplanan veriler neticesinde, ASTM D2493 / D2493M-09 standartlarına uygun olarak viskozite sıcaklık grafiği geliştirilmiştir (Şekil 4.12). Geliştirilen grafikten AASHTO T 316 standartına uygun olarak 170 ± 20 mPa.s ve 280 ± 30 mPa.s. bitüm viskozitelerine karşılık gelen laboratuvar karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları belirlenmektedir.



Şekil 4.12 Bitümlü bağlayıcılar için viskozite-sıcaklık eğrisi

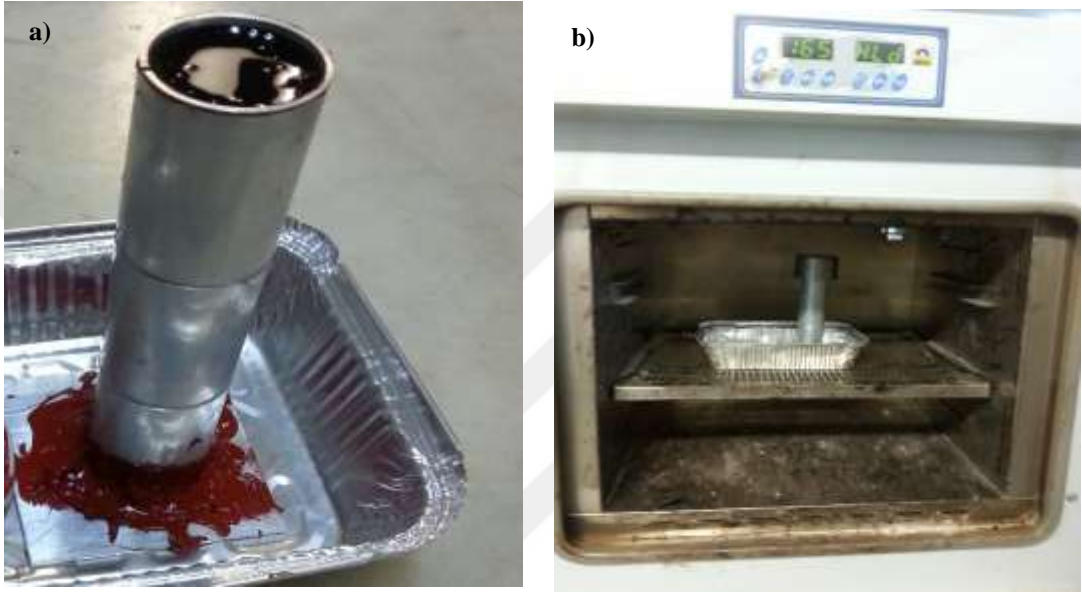
4.2.3.5 Depolama Stabilitesi Deneyi (TS EN 13399)

Modifiye bitümler, yüksek sıcaklıkta muhafaza edilen silolarda uzun süreli depolamaya maruz kalabilir. Bu durum, polimer-bitüm faz ayrışmasına neden olarak modifiye bitümden beklenen performansta kayıp ile sonuçlanabilir. Nanomalzemelerin, yüksek sıcaklıklarda bitümün depolama kararlılığı üzerindeki etkisini gözlemlemek için TS EN 13399 standardına uygun olarak depolama stabilitesi deneyleri gerçekleştirilmiştir.

Bu deney için özel olarak alüminyumdan imal edilen 32 mm çap ve 160 mm yükseklikteki silindirik kaplar kullanılmıştır. Kaplar üzerine 3 eşit parçaya kolayca kesmeyi temin edebilmek amacı ile yivler açılmıştır. Silindirik kaplara özenle doldurulan nanomodifiye bitüm örnekleri 180 ± 5 ° C'lik etüvde 72 ± 1 saat süreyle tutulduktan sonra soğuması için oda sıcaklığında bekletilmişlerdir. Daha sonra silindirik kalıplar açılan yivlerden kesilerek üç eşit parçaya ayrılmıştır. Orta kısım atılarak silindirin alt ve üst parçalarındaki bitüm numuneleri üzerinde yumuşama noktası ve penetrasyon deneyleri yapılarak değerler arasındaki farka bakılmıştır. Alt ve üst parçalar için çıkan sonuçlar arasındaki farkın şartname sınırının altında kalması gerekmektedir. Şartname sınırı olarak, Modifiye Bitüm Teknik Şartnamesi'nde yer alan ve iklim özelliklerine göre belirlenmiş dört tip sınırdan uygun olan seçilir ve kontrol edilir. Deneysel çalışmalarda silindirin üst ve alt parçalarındaki bitümlerin

yumuşama noktası değerleri arasındaki fark $\leq 2,5$ °C ise, numune depolamada kararlı olarak kabul edilmiştir.

Şekil 4.13a ve 4.13b’de hazırlanan silindirik numune kalıbı gösterilmektedir. Silindirin alt ucu sıcaklığa dayanıklı silikon ile sızdırmazlığı temin edildikten sonra etüve yerleştirilmektedir.



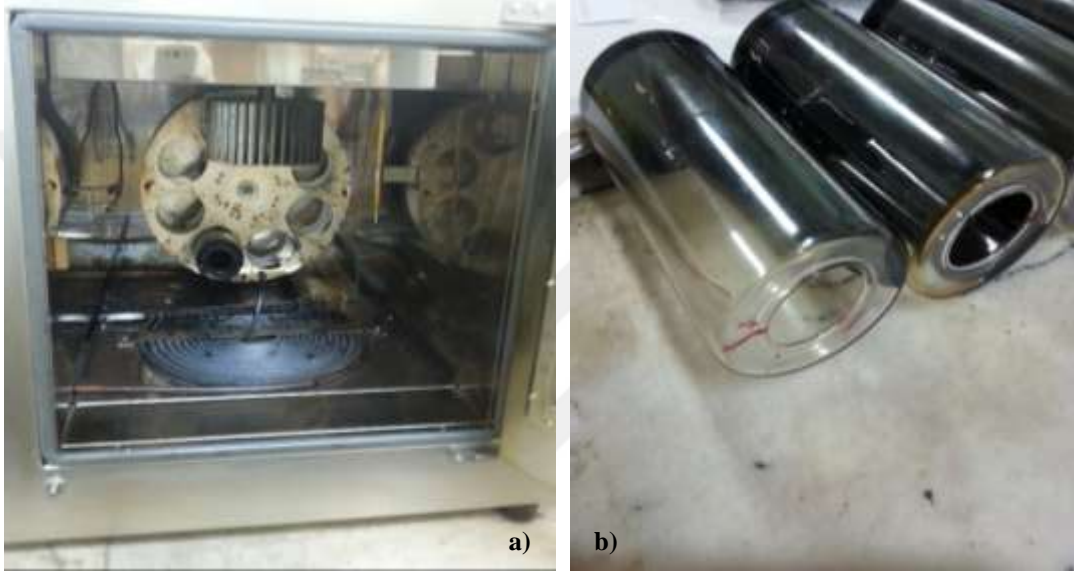
Şekil 4.13 a) Depolama stabilitesi deneyi için silindirik numune kabı, b) Numune etüvün içinde (Kişisel arşiv, 2017)

4.2.3.6 Dönel İnce Film Halinde Isıtma Deneyi (ASTM D2872, ASHTO T240)

Bitüm bağlayıcılar iki fazda yaşlanmaya maruz kalırlar; Kısa süreli yaşlanma, karışımın yüksek çalışma sıcaklıklarında üretim, taşıma, serilme ve sıkıştırılması sırasında meydana gelir. Bitüm ısıtıldığında uçucu bileşenlerini kaybederek sertleşir. Uzun süreli yaşlanma, bitüm yaşlanmasının ikinci aşamasıdır. Saha testleri, yerine serilmiş asfalt kaplamada bulunan bitümlü bağlayıcının hizmet ömrü boyunca çok az miktarda uçucu madde kaybettiğini göstermektedir (Corbett ve Merz, 1975).

Saf ve modifiye bitümlerin kısa süreli yaşlanmasını temsil etmek için İnce Film Halinde Isıtma deneyine (TFOT) alternatif olarak daha hızlı bir yöntem olan Dönel İnce Film Halinde Isıtma Deneyi (RTFOT) geliştirilmiştir.

RTFOT Deneyleri, saf ve modifiye bitümlerde ASTM D2872-12'ye uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Özel cam şişenin içinde yaklaşık 35 gram bitüm örneği tartılarak 85 dakika boyunca 163 °C'lik sıcaklıkta bu deney için tasarlanmış dönel bir tablada 15 rpm'de döndürülür (Şekil 4.14). Şişede bulunan numune, ısıtma süresi sonunda yeniden tartılır ve ağırlık kaybı orijinal numunenin ağırlık yüzdesi olarak ifade edilir. Asfalt karışımlarında kullanılan bitümlü bağlayıcı, ağırlıkça % 1'den fazla kayıp göstermemelidir (Pavement Interactive, 2012d).



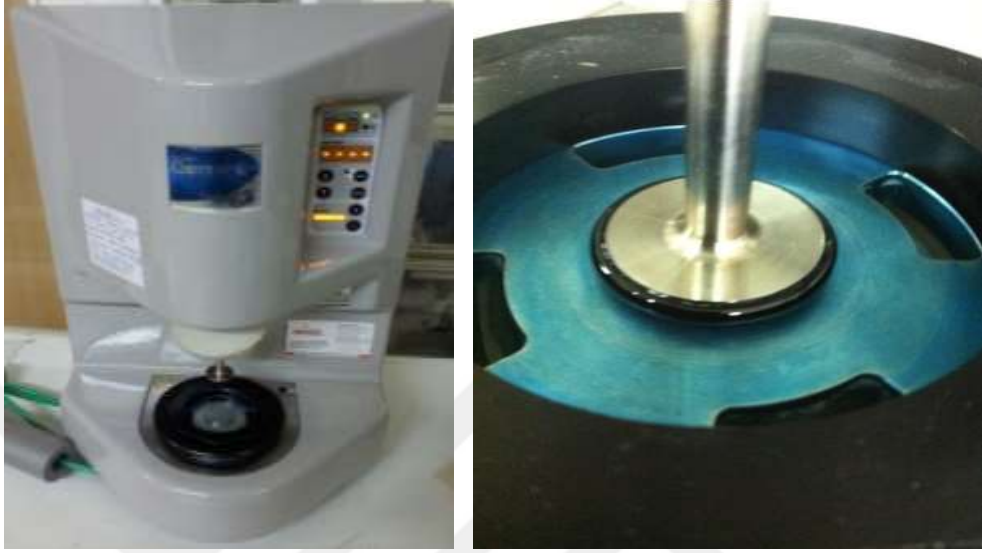
Şekil 4.14 a) RTFOT cihazı, b) Numune doldurulmuş şişeler (Kişisel arşiv, 2017)

4.2.3.7 Dinamik Kayma Reometresi (DSR) Deneyleri (ASTM D7175, AASHTO T 315)

Dinamik Kesme Aleti, bağlayıcı davranışının yükleme süresi ve sıcaklıkla ilişkisi dikkate alınarak Strategic Highway Research Program (SHRP) tarafından geliştirilmiştir. Bu alet kullanılarak bitümlü bağlayıcının orta ve yüksek sıcaklıklardaki kompleks kayma modülü (G^*) ve faz açısı (δ) gibi reolojik özellikleri ölçülmektedir. DSR deneyi ile bitümlü bağlayıcıların tekerlek izi oluşumuna ve yorulmaya karşı dayanımları belirlenmektedir.

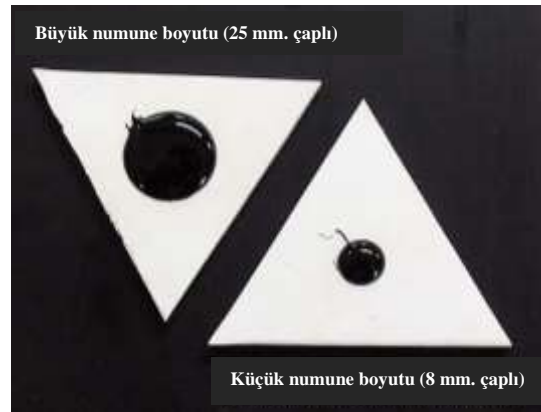
Çalışma kapsamında uygulanan DSR deneylerinde, Şekil 4.15'te görülen Bohlin Gemini II dinamik kayma reometresi kullanılmıştır. Deneye başlamadan önce

bağlayıcı, akıcı hale getirilinceye kadar ısıtılmış ve uygun numune kalınlığı elde etmek üzere plakalar arasına yerleştirilmiştir. İki plaka arasından taşan kısımlar özenle temizlendikten sonra gerekli boşluk değeri ayarlanmıştır.



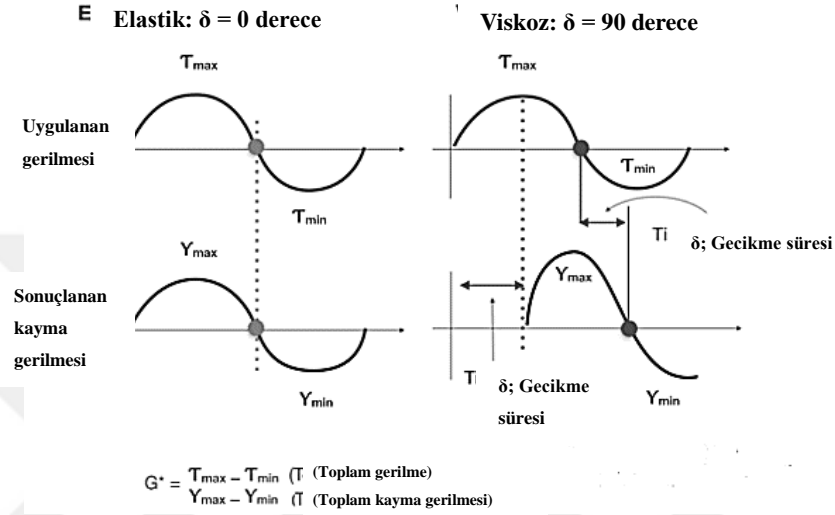
Şekil 4.15 Dinamik Kayma Reometresi (DSR) (Kişisel arşiv, 2017)

Bağlayıcı, biri sabit, diğeri sağa ve sola küçük salınım hareketleri yapan iki paralel plaka arasına yerleştirilmektedir. Doğru numune kalınlığı bu iki plaka arasındaki boşluğun ayarlanmasıyla elde edilmektedir. Deneyleerde boşluk yüksekliğine göre iki ayrı çapta plaka kullanılmaktadır. Plaka çapları ve boşluk yükseklikleri bağlayıcının yaşlanma durumuna göre seçilmektedir. RTFO ile yaşlandırılmış bağlayıcılarda 1000 mikron boşluk ve 25 mm çaplı plaklar; PAV ile yaşlandırılmış bağlayıcılarda ise, 2000 mikronluk boşluk ve 8 mm çaplı plakalar kullanılmaktadır (Şekil 4.16).



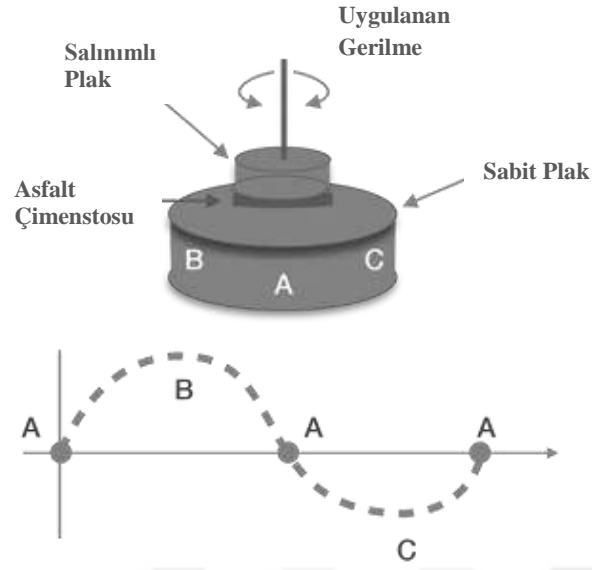
Şekil 4.16 Dinamik kayma reometresi (DSR) numune kalıpları (Pavement Interactive, 2012e)

Dinamik kesme deneyi, bitümlü bağlayıcıların kompleks kayma modülünü ve faz açısını ölçerek hem viskoz hem de elastik davranışını belirlemektedir. G^* , sürekli tekrar eden kesme gerilmeleri altında oluşan deformasyonlara karşı bağlayıcının gösterdiği toplam direncin bir ölçüsüdür. δ ise, viskoz ve elastik deformasyonun bağıl miktarlarının göstergesidir (Şekil 4.17).



Şekil 4.17 Faz açısı eğrisi değişikliği (Majeska, 2016)

Deney, 1000 μm aralık ve 25 mm çaplı plakalar kullanılarak salınım hızı 10 rad/sn (1,59 devir/sn) frekansta gerilme kontrollü olarak yapılmış olup, orijinal numunelere 120 Pa, yaşlandırılmış numunelere 220 Pa sabit gerilme uygulanmıştır. Isıtılan bitüm örnekleri, silikon kalıplara dökülerek, 10-15dk boyunca oda sıcaklığında bekletilmiştir. Soğuyan modifiye bitüm örnekleri silikon kalıplardan çıkartılarak DSR cihazına ait alt ve üst plakalar arasına yerleştirilmiştir. DSR cihazına ait üst plaka, 1050 μm seviyesindeyken bitüm örneklerinin taşan kısımları özenli bir şekilde temizlenmiştir. Bu işlemin ardından, alt ve üst plakalar arasındaki mesafe 1000 μm 'ye ayarlanmış ve deney başlatılmıştır. DSR'nin çalışma mekanizması Şekil 4.18'de görüldüğü gibidir. Deney sonucunda, saf bitüme ait orijinal ve yaşlandırılmış bitüm örnekleri ile farklı IKA katkı ve içeriklerde hazırlanan bitüm örneklerinin farklı sıcaklıklardaki DSR deney sonuçlarına göre G^* , δ ve $G^*/\sin\delta$ tekerlek izi parametrelerinin sıcaklıkla değişim grafikleri belirlenmiştir.



Şekil 4.18 DSR çalışma prensibi ve sonucunda oluşan eğri (Majeska, 2016)

Elde edilen G^* ve δ değerleri, SUPERPAVE bağlayıcı karakterizasyon sisteminde (AASHTO T315) belirtilen PG asfalt bağlayıcı spesifikasyonlarına göre bitümün tekerlek izine ($G^*/\sin \delta$) ve yorulma çatlaklarına ($G^* \cdot \sin \delta$) karşı performansının tahmininde kullanılır. DSR deneyi genellikle Tablo 4.9'da belirtilmiş olan, şartlandırılmamış, kısa süreli (RTFO-yaşlı) ve uzun süreli (PAV-yaşlı) numuneler üzerinde gerçekleştirilir.

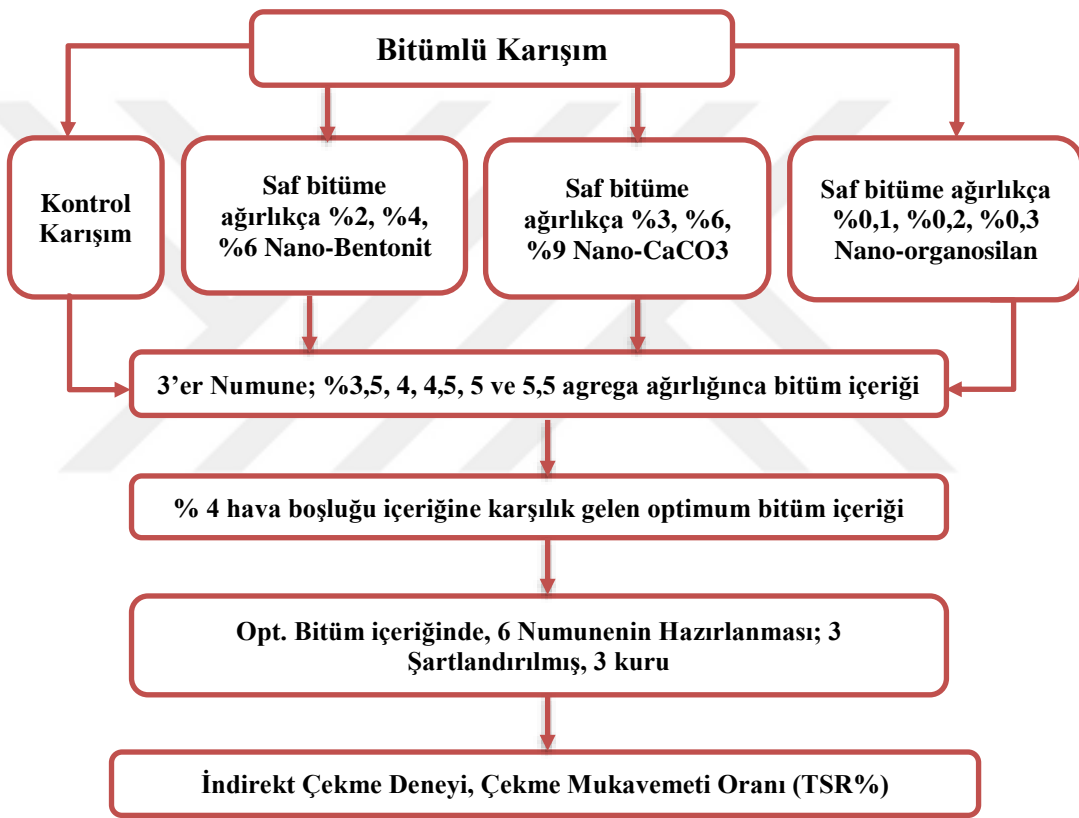
Tablo 4.9 PG sınıfı asfalt bağlayıcılar için DSR şartname kriterleri (Pavement Interactive, 2012e)

Bağlayıcı Türü	Parametreler	Deney Amacı	Şartname Limitleri
Orijinal	$G^*/\sin \delta$	Tekerlek izi oluşumuna karşı dayanım	$\geq 1,0$ kPa (0,145 psi)
RTFOT kalıntısı	$G^*/\sin \delta$		$\geq 2,2$ kPa (0,319 psi)
PAV kalıntısı	$G^* \times \sin \delta$	Yorulmaya karşı dayanım	≤ 5000 kPa (725 psi)

Bu çalışmada, saf ve nanomodifiye bitümlerin yaşlanmamış ve RTFOT ile yaşlandırılmış örnekleri üzerinde DSR deneyleri 0,01 ve 10 Hz frekanslarında 50-80 °C'ler arasında 10°C'lik artışlarla 4 farklı sıcaklıkta gerçekleştirilmiştir. Yüksek kritik sıcaklık performansı derecelendirmesi Tablo 4.9'a göre belirlenmiştir.

4.2.4 Asfalt Karışım Deneyleri

Asfalt karışımları ile ilgili çalışmalarda izlenen yol Şekil 4.19'daki akış şemasında görüldüğü gibidir. Farklı nanomalzemelerin farklı içeriklerinde modifiye edilmiş bitümler ve kontrol karışımı ile hazırlanan asfalt karışımları ile Marshall karışım tasarımı yapılmıştır. Marshall karışım tasarımından elde edilen optimum bitüm yüzdelerinde hazırlanan asfalt briketleri üzerinde dolaylı çekme deneyleri yapılarak neme karşı hassasiyet (TSR) değerlendirmesi yapılmıştır.



Şekil 4.19 Bitümlü karışımlar üzere uygulanan prosedürler için akış şeması

4.2.4.1 Marshall Karışım Tasarımı (ASTM D 1559, AASHTO T 245)

Bitümlü karışımlarda tasarım, sağlam (durabil) bir üstyapı elde gerekli bitüm miktarını bulabilmek, trafik yükleri altında deformasyon göstermeyecek yeterlikte karışım stabilitesini oluşturabilmek, sıkıştırılmış karışımda kasma, akma ve stabilite düşüklüğü olmaksızın trafik tarafından oluşturulacak çok az miktardaki sıkışmaya imkan verecek, ancak karışım içinde nem ve fazla hava barındırmayacak ölçüdeki

boşluğu sağlamak, karışım içerisindeki agregaların segregasyona uğramadan uygun serim yapılacak şekilde işlenebilirliği verecek, ekonomik bir karışım ve agrega gradasyonu belirlemek amacıyla yapılır.

Marshall mix tasarım metodu, dünyanın birçok yerinde yol mühendisleri arasında asfalt karışımları tasarlamak için kullanılan en eski ve en yaygın yöntemlerden biri olarak kabul edilmektedir. Yöntem ilk olarak 1939'da Bruce Marshall adlı bir Amerikalı mühendis tarafından geliştirilerek Mississippi Karayolları Müdürlüğü için tasarlanmıştır.

Bu yöntem, İkinci Dünya Savaşı sırasında ve sonrasında tüm dünyada ABD ordusu tarafından benimsenmiş ve kullanılmış olup, diğer çağdaş tasarım yöntemlerinden nispeten daha basit ve ucuzdur (Pavement Interactive, 2012f). Marshall yöntemi, minimum stabiliteyi ve akış değerlerini karşılayan istenen yoğunlukta optimum bitüm içeriğini belirlemeyi amaçlamaktadır (White, 1985). Marshall yönteminde, Şekil 4.20'de gösterilen Marshall stabilite ve akma değerlerinin belirlenmesinde kullanılan Marshall cihazı kullanılır. Bitümlü kaplamaların laboratuvar koşullarında Marshall karışım tasarımı yapılırken, “Marshall Aletini Kullanarak Bitümlü Karışımların Plastik Akmaya Karşı Direnci İçin Standart Deney Yöntemi (ASTM D 1559)” kullanılmaktadır.

Belirlenen gradasyona göre hazırlanan agrega karışımları (yaklaşık 1150 gram) ayrı ayrı tepsilere konularak karıştırma sıcaklığının yaklaşık 10 °C üstüne erişmesi için etüvde bir süre bekletilir. Bu sırada bitümlü bağlayıcı, üniform bir şekilde ısıtılana kadar karıştırma sıcaklığında fırında tutulur. Malzemeler istenilen sıcaklıklara geldiğinde, hem bitüm hem de agregalar karıştırma kabına konularak karıştırıcı yardımıyla agregalar bitümle tamamen kaplanana kadar iyice karıştırılır (Şekil 4.21) (KTŞ, 2013).



Şekil 4.20 Marshall stabilite deney cihazı (Kişisel arşiv, 2017)



Şekil 4.21 Bitüm ve agregayı karıştırmak için kullanılan karıştırıcı (Kişisel arşiv, 2017)

Karıştırma işleminin ardından elde edilen bitüm-agrega karışımı, 101,6 mm (4 inç) çapında ve 63,5 mm (2,5 inç) yüksekliğindeki önceden ısıtılmış Marshall kalıplarına

konur ve yüzey düzgünlüğünü sağlamak için 10 darbe ile hafifçe şişlenir Belirlenen sıkıştırma sıcaklığına kadar soğuyan karışım, Marshall kompaktörüne yerleştirilerek, her iki yüzüne de Karayolları Teknik Şartnamesi'nde (KTŞ) belirtilen Aşınma Tabakası Tip-1 için 75'er darbe vurulur (KTŞ, 2013) (Şekil 4.22). Bu sayıdaki darbe, bir milyondan fazla Eşdeğer Tek Dingil Yüğü'nden ağır trafiğı simüle eder. Darbe sayısının seçimi, Türkiye Karayolu Teknik Şartnamesi'nde (KTŞ, 2013) açıklanmıştır. Karıştırma ve sıkıştırma işlemi, her iki işlemin de verilen sıcaklık aralığında yürütüldüğünden emin olmak için yeterince hızlı olmalıdır.



Şekil 4.22 Marshall kompaktör (Kişisel arşiv, 2017)

Sıkıştırma işleminden sonra oda sıcaklığına kadar soğutulan asfalt briketi Marshall kalıbının taban plakası ile üst yakası çıkarılarak krikoya yerleştirilir ve numuneye zarar vermeden kalıptan çıkarılır. Boyları ve çapları kumpas yardımıyla ölçülen numunelere ait havada, suda ve doygün yüzey kuru ağırlıkları (DYKA) belirlenir (Şekil 4.23).

Asfalt briketleri 30 ila 40 dakikalık eşit sürelerde 60 °C'de sıcak su banyosunda bekletildikten sonra Marshall stabilitesi ve akma deneyleri gerçekleştirilir. Bu deney Marshall karışım tasarımının performansının tahminini sağlar. Stabilite, Marshall

numunesi tarafından 50,8 mm/dak sabit bir yükleme hızında desteklenen maksimum yük olarak verilmiştir. Yükleme, maksimum dirençli yüke ulaşana kadar artar ve sonrasında hemen azalır. Bu anda yükleme durdurulur ve maksimum yükleme değeri kaydedilir. Asfalt briketlerin yüklenmesi sonucu plastik akmasını ölçmek için, bir LWDT de tertibata bağlanır. Akma değeri, yükleme maksimum değere ulaşıldığında tam olarak 0,25 mm'lik artışlarla kaydedilir. Tüm bu işlemlerin 30 saniyelik süre zarfında özenle yapılması gerekmektedir. Deney sonunda stabilite ve akma okumaları yapılarak veriler kaydedilir.



Şekil 4.23 Marshall tasarım yöntemine göre hazırlanmış asfalt numuneleri (Kişisel arşiv, 2017)

Bu çalışma kapsamında, kontrol karışımı olarak bir saf bağlayıcı ve üç farklı nanomalzemenin 3 üç farklı oranında (10 set) %3,5, %4, %4,5, %5 ve %5,5'lik bitüm yüzdeleri ile her bir bağlayıcı maddenin farklı yüzdeleri için en az üçer adet Marshall briketi hazırlanmıştır. Marshall karışım tasarımında bu 10 set karışımın optimum bağlayıcı içeriği belirlemek için toplamda 150 Adet Marshall briketi hazırlanmıştır.

Sıkıştırılmış bitümlü kaplamalarda karışım analizi için ilk olarak, kaba ve ince agreganın hacim özgül ağırlıkları (G_{kb} ve G_{ib}) bulunarak, karışımında kullanılacak olan mineral fillerin zahiri özgül ağırlığı (G_{fa}) ile bitümün özgül ağırlığı tayin edilir. Bunlara ek olarak, bitümlü karışım içerisindeki agrega karışımının hacim özgül ağırlığı hesaplanır. Daha sonra, gevşek kaplama karışımının maksimum özgül ağırlığı bulunarak, sıkıştırılmış bitümlü karışımın hacim özgül ağırlığı tayin edilir.

Sonraki aşamalarda ise, agreganın efektif özgül ağırlığı (G_{ef}), agreganın bitüm absorpsiyonu (P_{ba}), bitümlü karışımın efektif bitüm miktarı (P_{be}), sıkıştırılmış bitümlü

karışımındaki agregalar arası boşluk yüzdesi (VMA), sıkıştırılmış bitümlü karışım içindeki hava boşluğu yüzdesi (V_h) ve sıkıştırılmış bitümlü karışımın asfaltla dolu boşluk yüzdesi (VFA) bulunur.

Optimum bitüm miktarını bulabilmek için öncelikle tüm hacimsel parametrelerin, stabilite ve akma değerlerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu parametrelerin şartnamelerde verilen sınırlar içerisinde kalması suretiyle %4 hava boşluğu sağlayan bitüm miktarı optimum bitüm miktarı olarak atanır. Bu sebeple asfalt yüzdesi ve boşluk oranı grafiğinde %4 boşluk sağlayan bitüm yüzdesinin sebep olduğu VMA, VFA, stabilite ve akma değerlerinin şartname sınırları içerisinde olup olmadığı kontrol edilir. Tüm parametreler sınırlar içerisinde kalıyorsa, optimum bitüm miktarı bulunmuş olur. Tablo 4.10'da Aşınma Tip-1 gradasyonu için Karayolları Teknik Şartnamesinde yer alan Marshall tasarım yöntemi kriterleri verilmiştir (KTŞ, 2013).

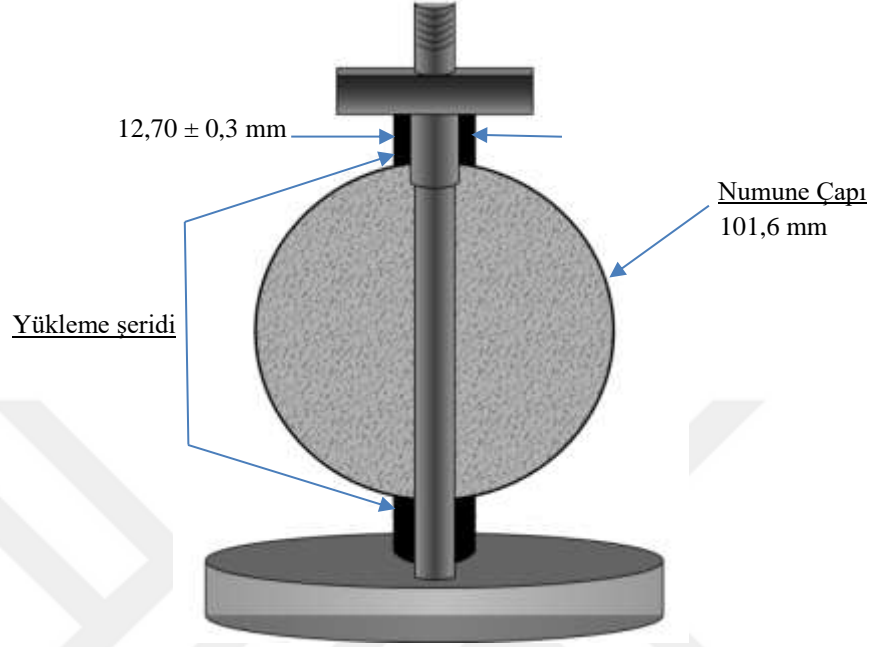
Tablo 4.10 BSK Tip-1 aşınma tabakası için Marshall tasarım kriterleri (KTŞ, 2013)

Tasarım Parametreleri	Standart	Kriterler (Aşınma Tip-1)
Sıkıştırma (numunenin her iki yüzüne uygulanan darbe sayısı)	TS EN 12697-30	75
Stabilite (kg)	TS EN 12697-34	900
Akma (mm)	TS EN 12697-34	2-4
Hava boşluğu (%)	TS EN 12697-8	3-5
VFA (%) (asfaltla dolu boşluk yüzdesi)	TS EN 12697-8	65-75
VMA (%) (Nominal maks. agrega boyutuna göre değişmektedir)	TS EN 12697-8	14-16
Filler/Bitüm oranı	-	1,5
İndirekt çekme mukavemeti oranı; TSR	AASHTO T 283	\geq %80

4.2.4.2 İndirekt Çekme Mukavemeti (ITS) Deneyi (ASTM D6931)

Bu test, asfalt karışımlarının gerilme mukavemetini değerlendirmek için sıkıştırılmış silindirik numuneler üzerinde gerçekleştirilmektedir. 101,6 mm çapında asfalt briketi Şekil 4.24'te gösterildiği gibi, dikey çaplı düzlemi boyunca, $50 \pm 0,5$ mm/dk'lık bir yükleme hızı ile 25 °C'lik bir sıcaklıkta 80 kPa yük uygulanarak yapılır.

Kırılma anındaki yük değeri kaydedilir ve elde edilen değer bu örneğin dolaylı çekme dayanımının hesaplanmasında kullanılır.



Şekil 4.24 İndirekt çekme mukavemeti- illüstrasyon (ASTM D 6931)

Dolaylı çekme dayanımı deneyinde elde edilen sonuçlar, belirli bir karışımın tekerlek izinde oluklanma ve çatlamaya karşı performansını tahmin etmeyi amaçlamaktadır. Bu deney yöntemi aynı zamanda asfalt karışımı tasarımının potansiyel nem kaynaklı hasarlara karşı dayanımını tahmin etmeyi amaçlamaktadır. Olası hatalardan kaçınmak için her bir karışım için en az üç asfalt briketi dökülür. Deney örneklerinin $7,0 \pm 1,0$ hava boşluğu içeriğine sahip olacak şekilde sıkıştırılmaları gerekir.

ASTM D 6931 standardında tanımlanan deneysel çalışma adımları aşağıdaki gibidir:

- Asfalt numunelerinin yüksekliği ASTM D 3549 standardına uygun olarak 1 mm hassasiyetinde belirlenir.
- Asfalt numuneleri 25 ± 1 °C'ye getirilmiş su banyosunda 2 saat \pm 5 dakika boyunca bekletilerek sıcaklık kararlılığı sağlanır.

- Asfalt numuneleri su banyosundan çıkarılır ve İndirekt Çekme Deney yönteminde bulunan bir test çerçevesine yerleştirilerek üst yükleme şeridi numuneye degecek şekilde indirilir.
- Üst ve alt yükleme şeritlerinin test numunesinin düşey çap düzleminde ve merkezlenmiş olduğuna dikkat edilir (Şekil 4.25).
- Son iki adımın tamamlanma süresi 2 dakikayı geçmemelidir.
- Düşey olarak $50 \pm 0,5$ mm/dk yükleme oranında yük uygulanır.
- Numunenin kırıldığı andaki yük değeri kaydedilir.

Aşağıdaki denklem, bir deney numunesinin dolaylı çekme dayanımının hesaplanmasında kullanılır:

$$ITS = (2000 P_{\max}) / \pi tD \quad (4.1)$$

Burada ITS, kPa cinsinden asfalt numunesinin çekme dayanımını göstermek üzere P, N cinsinden kaydedilen maksimum yük, t, mm cinsinden numune yüksekliği ve D, mm cinsinden numunenin çapıdır.



Şekil 4.25 Sıkıştırılmış numunenin indirekt çekme dayanımı ölçümü için cihaza yerleştirilmesi (Kişisel arşiv, 2017)

Bu çalışmada, nemin varlığında karışımın performansını tahmin etmek için kullanılan Çekme Dayanımı Oranı (TSR%) 'nın hesaplanması için gerekli verileri elde etmek amacıyla hem ıslak hem de kuru numunelerde dolaylı çekme dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiştir.

4.2.4.3 Modifiye Lottman Deneyi (AASHTO T 283-07)

Nem hasarı, bir sıcak asfalt karışımındaki bitüm-agrega ara yüzünde nem etkileşiminin bir sonucu olarak ortaya çıkar. Bu etkileşimin bir sonucu olarak, bitüm ile agrega arasındaki bağ azalarak soyulma denilen hasar meydana gelir. Soyulma, tekerlek izi ve yorulma çatlakları da dahil olmak üzere çeşitli şekillerde BSK kaplamalarda bozulmalara yol açabilir (Pavement Interactive, 2012g). Bitüm ve agrega arasındaki bağın dayanımı BSK'nın nem duyarlılığını değerlendirmede önemli bir rol oynar (Canestrari ve diğerleri, 2010).

Uzun yıllardır, nemin asfalt karışımlarının fiziksel ve mekanik özelliklerini etkileyebileceği öngörülmüştür (Hunter ve Ksaibati, 2002). 1930'larda, nem duyarlılığını tahmin etmek için deney yöntemleri geliştirilmeye başlanmış ve çok sayıda deney yöntemi geliştirilmiştir (Airey ve Choi, 2002). Asfalt endüstrisinde genel kabul görmüş bir uzlaşma, sıkıştırılmış BSK numune üzerinde yapılan laboratuvar deneylerinin, gevşek karışım numunelerine yapılan deneylerden daha hassas bir şekilde nem hassasiyetini tahmin etme potansiyeli olduğudur (Solaimanian ve diğ., 2007).

Günümüzde, sıcak karışım asfaltların suya bağlı bozulmalara karşı dayanımının tespit edilmesi amacıyla AASHTO T 283 “Sıkıştırılmış Bitümlü Karışımların Sudan Kaynaklanan Bozulmalara Karşı Direnci İçin Standart Deney Methodu” kullanılmaktadır. Bu yöntem, laboratuvarda sıkıştırılmış bitümlü karışım örneklerinin hızlandırılmış olarak suya koşullandırma ve doygunluk etkilerini değerlendirmek için uygulanmaktadır (Wasiuddin ve diğ., 2006).

Modifiye Lottman deneyi olarak adlandırılan bu deney yöntemi, teste tabi tutulan asfalt numunelerinin dolaylı çekme dayanımı değerlerine dayanmaktadır. Lottman, Tunncliffe ve Root deney yöntemlerinin bir birleşimidir. Kuru (koşullandırılmamış) numunelerin çekme dayanımı, ıslak veya koşullandırılmış (kısmen suyla doymuş) numunelerle karşılaştırılır. Deney, koşullandırılmış grubu kısmi vakum doygunluğuna ve isteğe bağlı olarak bir donma-çözülme döngüsüne tabi tutmayı amaçlamaktadır. Koşullandırılmış asfalt numunelerinin daha düşük bir çekme mukavemetine sahip olması beklense de, aşırı düşük çekme dayanımı değerleri, karışımın nem hasarı potansiyelini göstermektedir (Pavement Interactive, 2012g).

Bu çalışmada, bitümün nano malzemelerle modifikasyonunun, bu bitümlerle üretilen asfalt karışımlarının performansı üzerindeki etkisi, neme karşı duyarlılık ve soyulma açısından değerlendirilmiştir. Dolaylı çekme deneyi, optimum modifiye edici katkı ve optimum bitümlü bağlayıcı değerlerinde üretilen BSK sıkıştırılmış asfalt numuneleri üzerinde gerçekleştirilmiştir.

AASHTO T283 deney yöntemine göre, asfalt briketleri Marshall tokmağı ile sıkıştırılarak 7 ± 1 hava boşluğuna karşılık gelecek sıkıştırma sayıları belirlenip farklı sıkıştırma derecelerinde üretilerek 3'er adet kuru ve 3'er adet koşullandırılmış iki ayrı set halinde numuneler hazırlanmıştır. Birinci set, su vakumu ile %70-80 oranlarına kadar doymuş hale getirildikten sonra, numuneler plastik film ile sarılarak $-18 \pm 2^{\circ}\text{C}$ 'de 16 saat bekletilmiştir. Daha sonra, 60°C 'deki ılık su banyosunda 24 saat bekletilerek koşullandırma işlemi tamamlanmıştır. Koşullandırma sonrasında plastik film çıkartılarak numuneler 25°C 'lik su banyosunda 2 saat süre ile bekletilerek indirekt çekme deneyi uygulanmıştır. İkinci set ise asfalt briketleri plastik film ile kaplanarak, 25°C lik su banyosunda 2 saat süre ile bekletildikten sonra indirekt çekme deneyi uygulanmıştır.

Koşullandırılmış örneklerin indirekt çekme mukavemetlerinin ortalamasının koşullandırılmamış (kontrol) örneklerin indirekt çekme mukavemetleri ortalamasına oranı aşağıdaki denklem ile hesaplanan çekme dayanımı oranı (TSR) olarak ifade edilmiştir.

$$\text{TSR}\% = [\text{ITS}_{\text{koşullandırılmış}} / \text{ITS}_{\text{kuru}}] \times 100 \quad (4.2)$$

Burada, $\text{ITS}_{\text{koşullandırılmış}}$ koşullandırılmış numunelerin ITS değerlerinin ortalamasını (kPa), ITS_{kuru} ise koşullandırılmamış numunelerin ITS değerlerinin ortalamasını (kPa) ifade etmektedir. Standarda göre TSR değerinin %80'in üzerinde olması karışımın nem hasarına karşı dayanımının uygun olduğunu göstermektedir.



BÖLÜM BEŞ

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu bölüm, saf ve nanomalzemelerle modifiye edilmiş bitümlü bağlayıcıların değerlendirilmesi için yapılan deneysel çalışma sonuçlarını ve bu konuların literatür bilgileri ışığında yapılan tartışmalarını kapsamaktadır. Geleneksel Bitüm deneyleri ve Reolojik deneyler sonrasında, üretilen nano malzemelerin asfalt karışımlarının üretiminde kullanılması ile Marshall karışım tasarımının neme karşı duyarlılık performansı (AASHTO T283), saf ve nanomodifiye bağlayıcılar içeren asfalt karışımları için ayrı ayrı sunulmuştur.

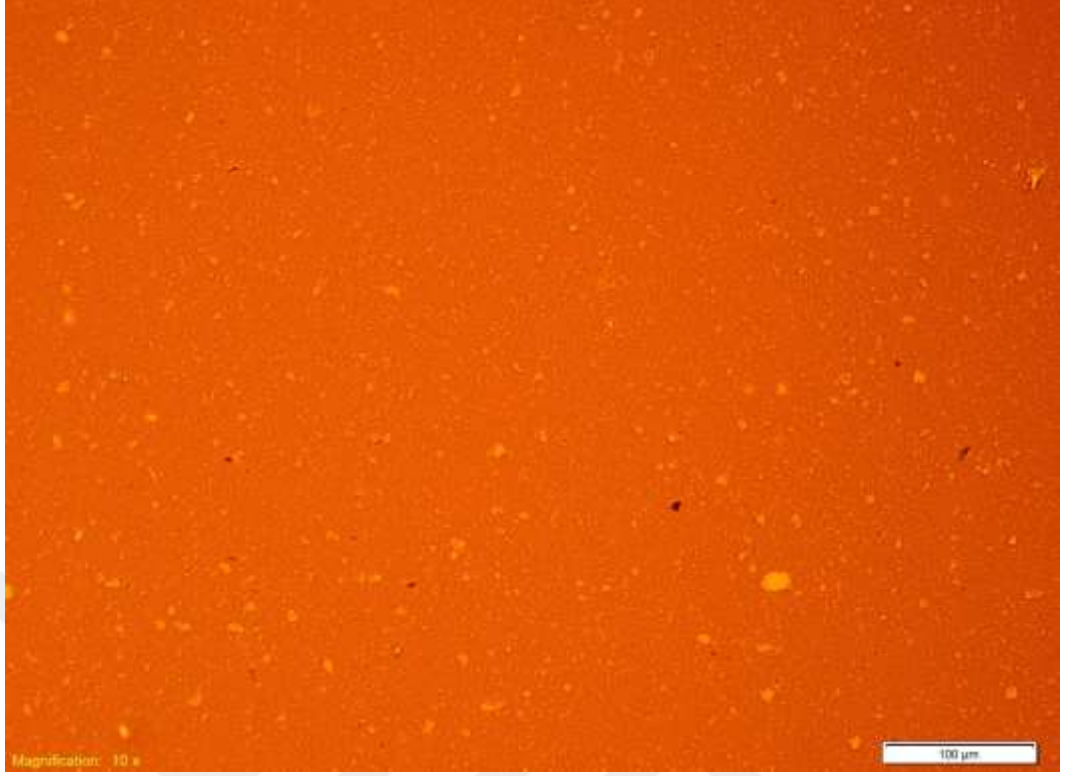
5.1 Bitüm Deneyleri

5.1.1 Floresan Mikroskopu ile Nanomodifiye Bitümlerin Karakterizasyonu

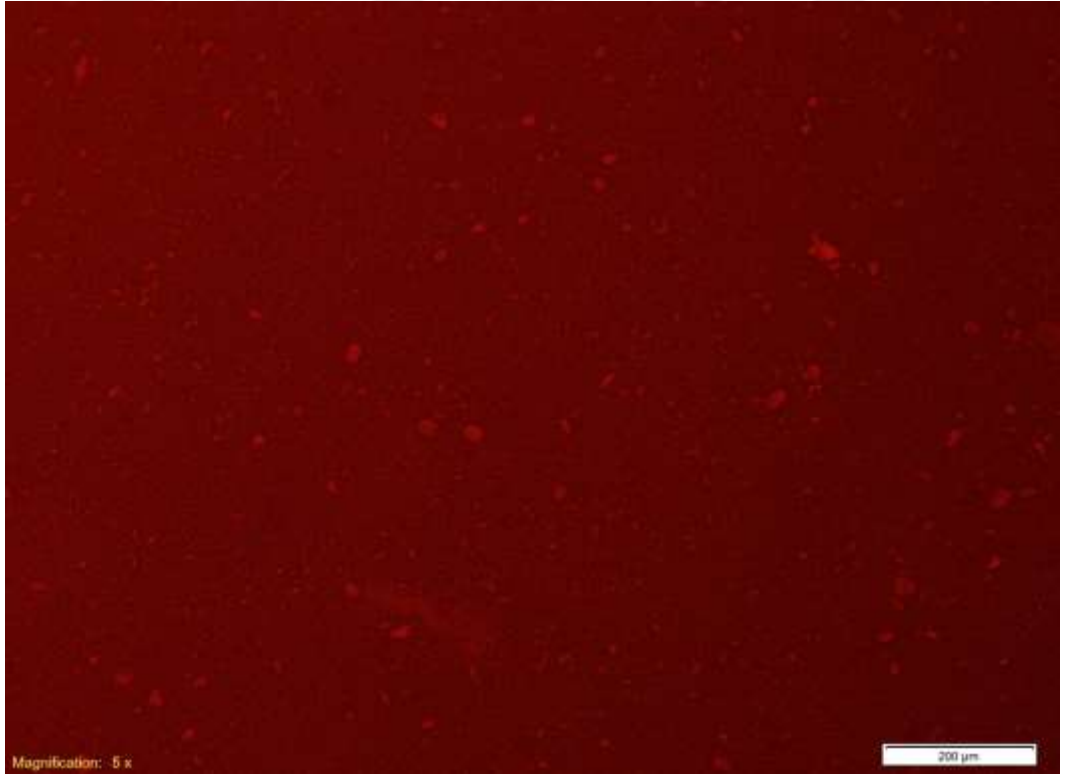
Nanomalzemelerle modifiye edilerek üretildikten sonra tüm bitümlü bağlayıcı numuneler, bir floresan mikroskop (Olympus BX43) ile mikro ölçekte bakılmıştır. Her numuneden ince kesitler alınarak floresan mikroskopun altında incelenmiştir. Bu morfolojik çalışmanın gerçekleştirilmesinin amacı ise bitüm fazındaki nanopartiküllerin homojen dağılıp dağılmadığını gözlemlemektir. Morfolojik inceleme mikro ölçekte olmasına rağmen, bitüm bağlayıcı ile nanoparçacık etkileşim tarzının anlaşılmasına yardımcı olmaktadır.

Her üç tip nanomalzeme ile modifiye edilmiş bitümlü bağlayıcı numunelerinin mikroskopik görüntüleri Şekil 5.1 - 5.9'da gösterilmiştir.

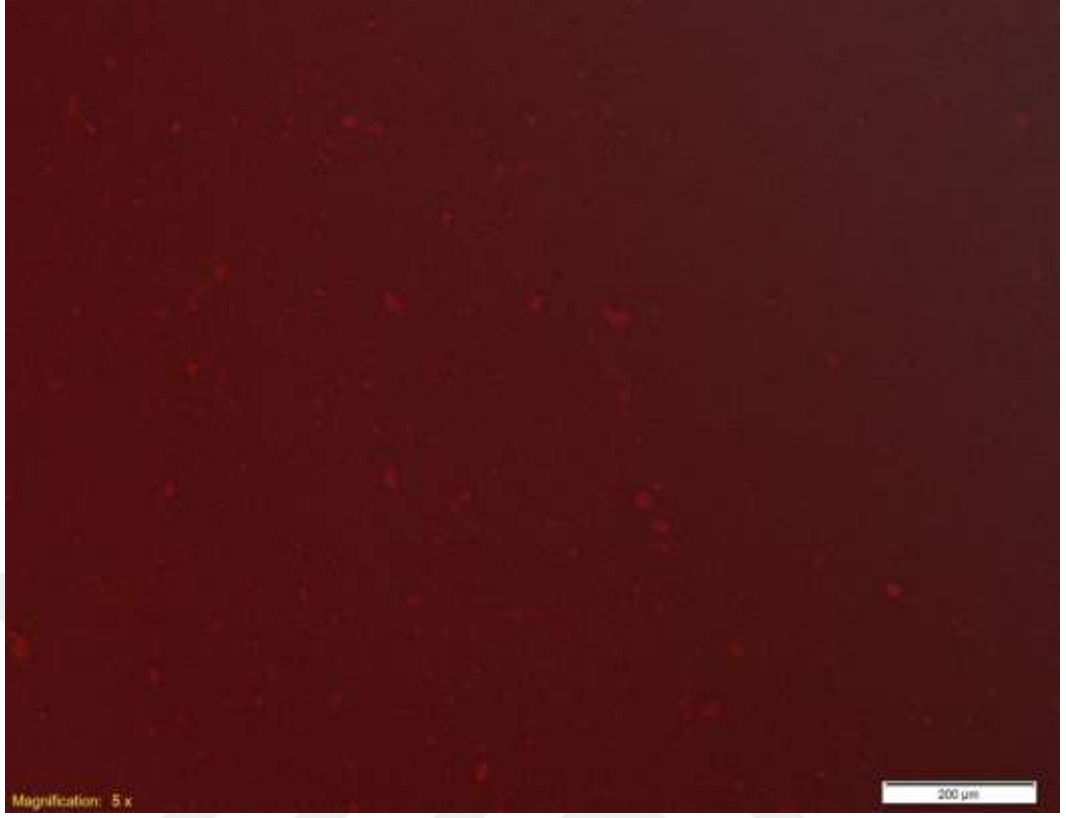
Şekil 5.1 – 5.3'te görüldüğü gibi, nano-Bentonit'in üç farklı yüzdesinde nanoparçacıkların bitümlü fazda düzgün dağılımını göstermektedir. Beyaz noktalar ve yığınlar nano-Bentonit katkısını temsil ederken kırmızı arka plan bitümlü fazdır. Üretilen nanomodifiye bitüm örneklerinin karıştırıldığı koşullar ideal görünmektedir. Mikroskopik ince film örneklerinde bazı boşluklar olmasına rağmen görüntü alma sırasında bu boş noktaları atlanarak net görüntüler elde edilmiştir.



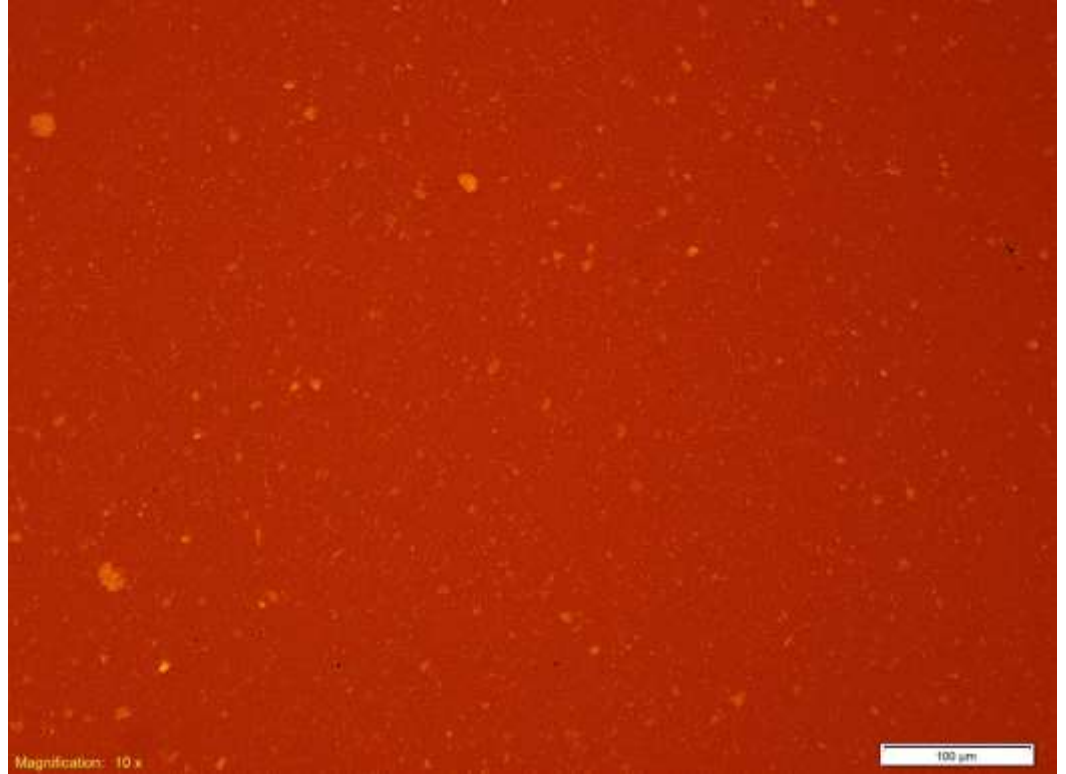
Şekil 5.1 %2 Nano-Bentonit modifiye bitüm numunenin fluoresan mikrografi



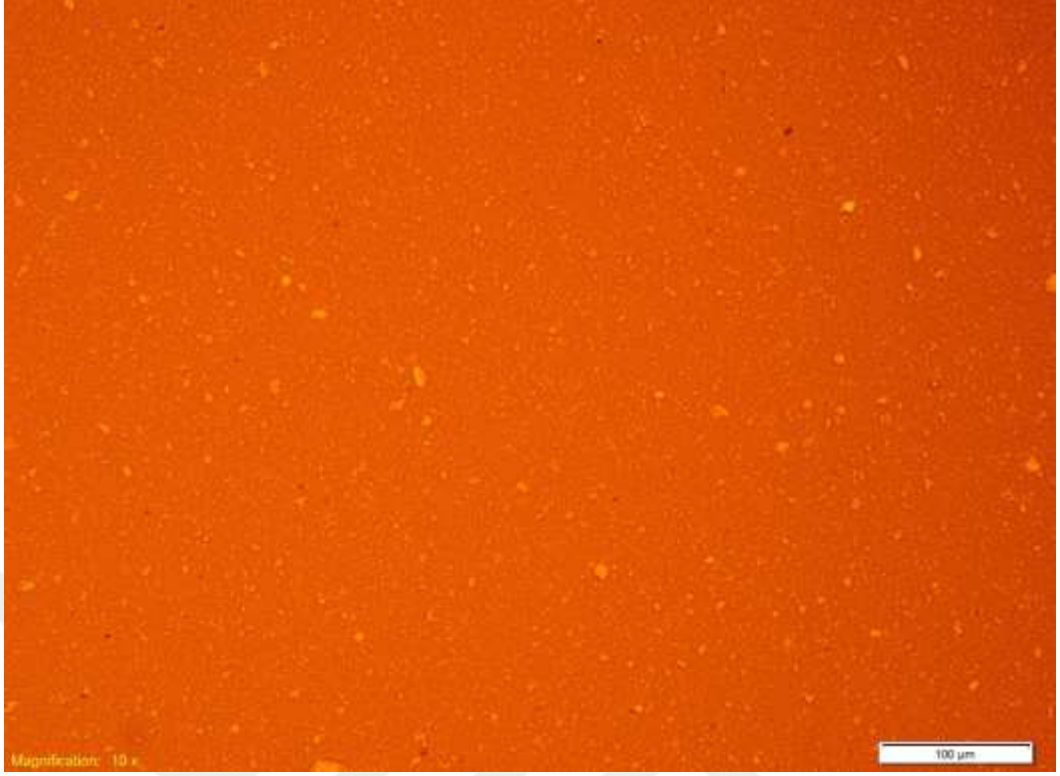
Şekil 5.2 %4 Nano-Bentonit modifiye bitüm numunenin fluoresan mikrografi



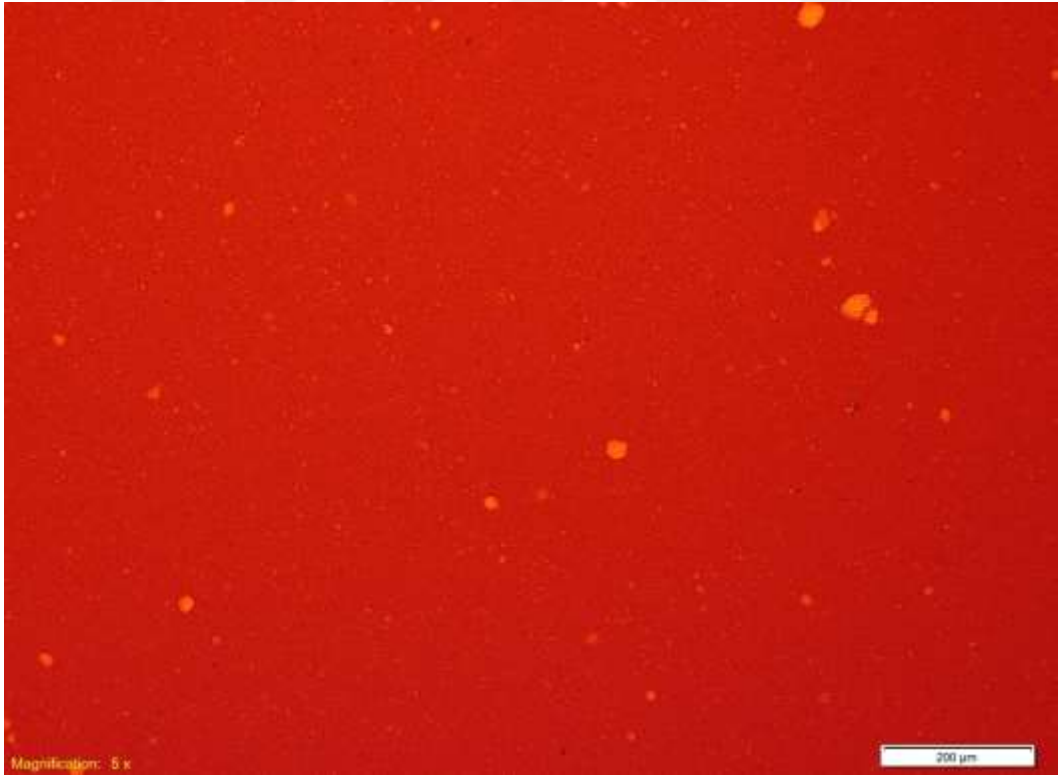
Şekil 5.3 %6 Nano-Bentonit modifiye bitüm numunenin fluoresan mikrografi



Şekil 5.4 %3 Nano-CaCO₃ modifiye bitüm numunenin fluoresan mikrografi



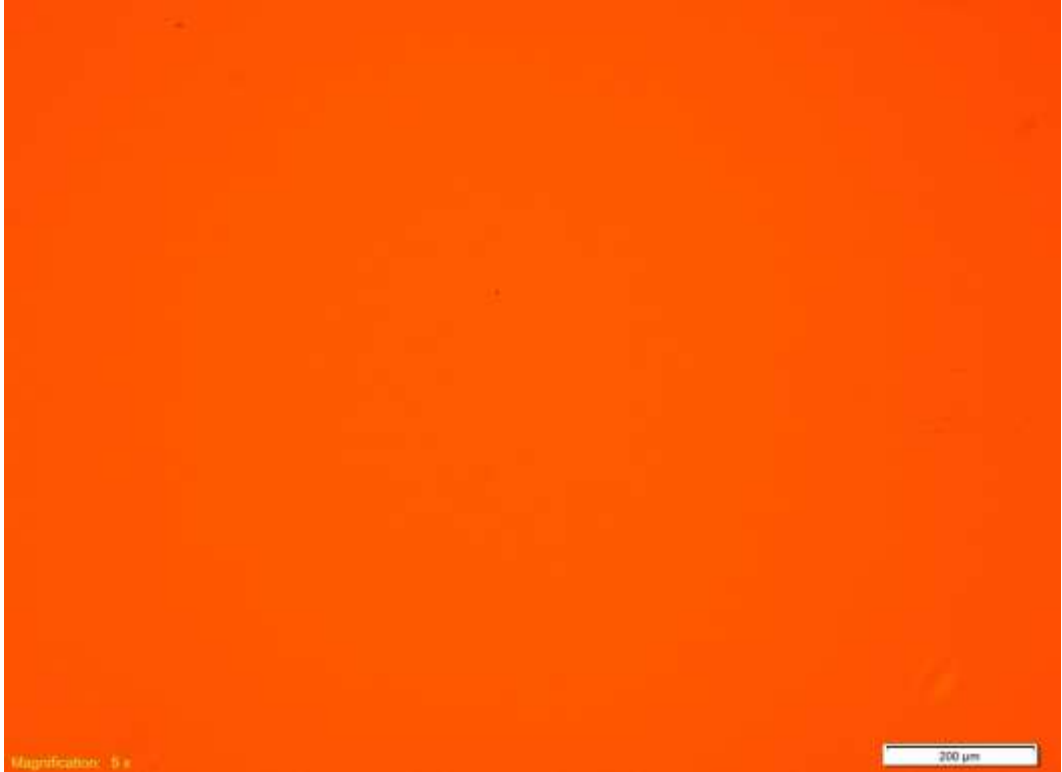
Şekil 5.5 %6 Nano-CaCO₃ modifiye bitüm numunenin fluoresan mikrografı



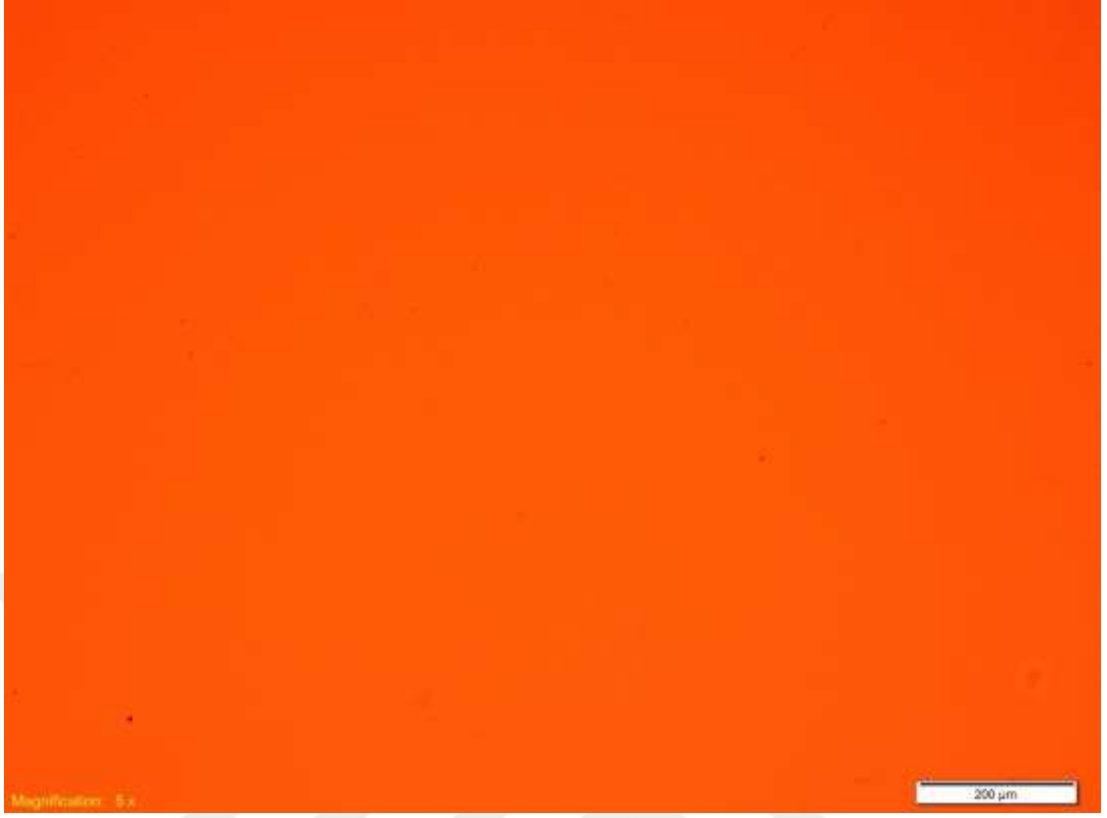
Şekil 5.6 %9 Nano-CaCO₃ modifiye bitüm numunenin fluoresan mikrografı

Şekil 5.4 – 5.6'da gösterildiği gibi, %9 nano-CaCO₃'ta, yüksek katkı oranına bağlı olarak, nanoparçacıklar kümelenmeye başlar ve mikro boyutlu yığınlar oluştururlar. Bu durum, %9 nano-CaCO₃ katkı oranında hazırlanan modifiye bitümün, %6 katkı oranında hazırlanana göre iyi performans göstermeyebileceği anlamına gelmektedir. Bitümdeki %6 nano-CaCO₃ içeriğinin homojen dağılımı, diğer oranlardan nispeten daha iyi performans göstermesini sağlayan özellikler kazandırmaktadır (Hao ve diğ., 2012).

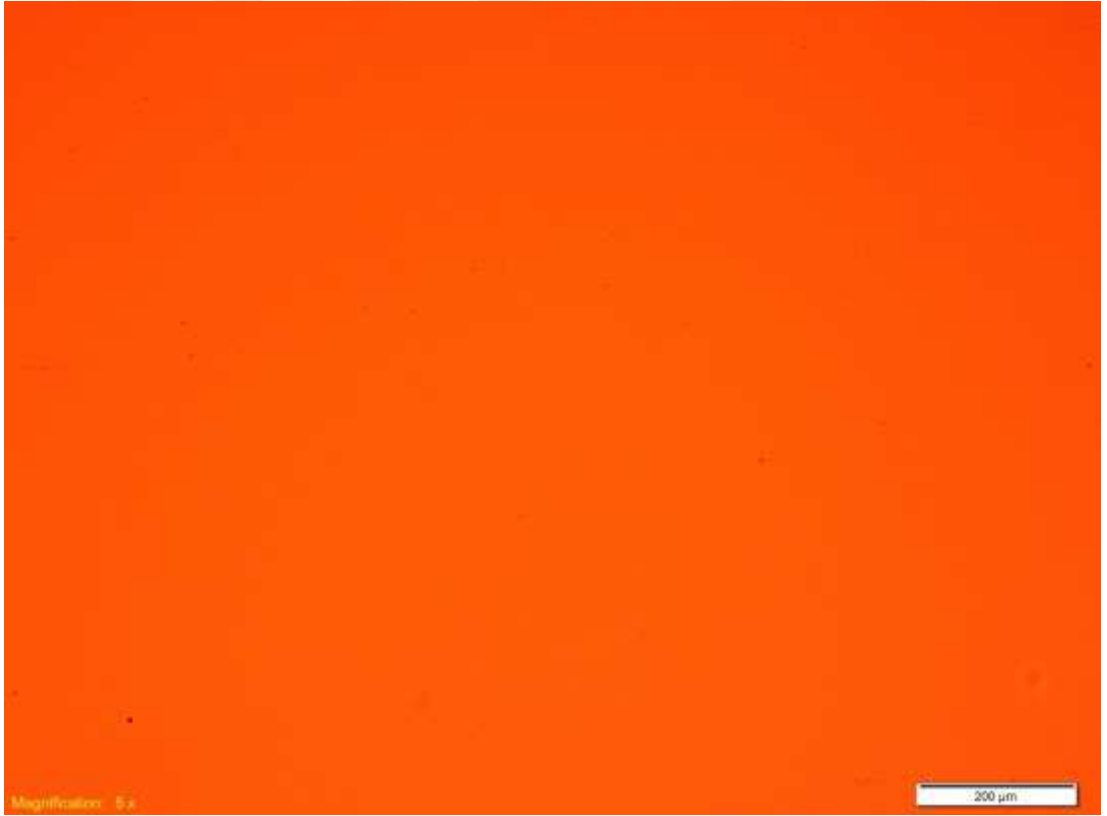
Şekil 5.7 – 5.9'a bakıldığında, nano-organosilan'ın bitüme eklenmesiyle, üç farklı karışım oranında da nano boyutta görülebilen morfolojik bir varyasyonun olmadığı görülebilmektedir. Bitümün kendisinde bulunan safsızlıkları temsil eden bazı siyah noktalar gözlenmektedir. Görüntülerden hiçbir şey elde edilmemesinin nedeni ise sıvı halde bulunan nano-organosilan'ın homojen bir karışım ile sonuçlanan bağlayıcı ile kimyasal ve fiziksel olarak tamamen harmanlanan bir katkı maddesi olmasıdır.



Şekil 5.7 %0,1 Nano-organosilan modifiye bitüm numunenin fluoresan mikrografı



Şekil 5.8 %0,2 Nano-organosilan modifiye bitüm numunenin fluoresan mikrografı



Şekil 5.9 %0,3 Nano-organosilan modifiye bitüm numunenin fluoresan mikrografı

Genel olarak, bu çalışmada kullanılan nanomalzemeler bitüm fazında dağılımı açısından tatmin edici sonuçlar vermiş ve her üç katkı için de homojen karışımlar üretilmiştir.

5.1.2 Geleneksel Bitüm Deneylerinin Sonuçları

Saf ve nanomodifiye bitümlü bağlayıcı örnekleri üzerinde yapılan geleneksel deneylerin sonuçları (penetrasyon deneyi, yumuşama noktası deneyi, 135°C ve 165°C'de Brookfield dönel viskozite deneyi) burada sunulmuş ve tartışılmıştır. Ek olarak, RTFOT-yaşlı bağlayıcılar üzerinde gerçekleştirilen penetrasyon ve yumuşama noktası deneylerinin sonuçları da bu bölümde yer almaktadır.

Sadece orijinal nanomodifiye edilmiş bağlayıcı numuneler üzerinde gerçekleştirilen Depolama stabilite testi sonuçları, uzun süreli depolama sıcaklıklarında bağlayıcının stabilitesinden emin olmak için burada sunulmaktadır. Penetrasyon indeksi ve RTFOT-yaşlanma sonrası kütle değişimi gibi diğer önemli elemanlar da hesaplanmış ve bitüm özelliğini karakterize edebilmektedir.

Tablo 5.1, geleneksel bitüm deneylerinin sonuçlarının özetini sunmaktadır. Sonuçlar ayrıca, bitümlü bağlayıcılar üzerindeki her bir içerik için nanomalzemelerle modifikasyonun etkisini gözlemlemek ve kolaylıkla karşılaştırabilmek için grafiksel olarak da gösterilmiştir.

Tablo 5.1 Saf ve nano modifiye bitüm numunelerinin geleneksel deney sonuçları

Test	Standart	Saf bitüm	Nano-Bentonit				Nano-CaCO ₃			Nano-organosilan		
		%0	%2	%4	%6	%3	%6	%9	%0,1	%0,2	%0,3	
Penetrasyon (25 °C; 100 gr; 5 s)	ASTM D 5-06	64,0	61,0	60,0	57,7	66,3	70,7	69,7	61,7	61,0	60,5	
Yumuşama noktası (°C)	ASTM D 36-06	51,5	52,9	53,2	54,7	52,8	53,2	54,7	51,7	52,1	53,5	
Penetrasyon İndeksi (PI)	-	-0,23	-0,02	0,01	0,26	0,18	0,45	0,77	-0,28	-0,21	0,11	
Viskozite (mPa.s, 135°C)	ASTM D 4402-06	425	475	600	775	425	463	575	100	125	113	
Viskozite (mPa.s, 165°C)	ASTM D 4402-06	138	138	200	288	125	125	175	425	450	425	
Dönel ince film etüvü deneyi (RTFOT) ASTM D 2872-12												
Kütle değişimi (%)	-	0,08	0,02	0,02	-0,01	-0,01	0,03	0,04	-0,07	-0,10	-0,10	
RTFOT sonrası penetrasyon	ASTM D 5-06	39,0	39,3	41,0	41,4	45,2	45,6	45,2	41,7	39,3	40,3	
Kalıcı penetrasyon (%)	-	60,9	64,5	68,3	71,8	68,1	64,5	64,8	67,6	64,5	66,5	
RTFOT sonrası yumuşama noktası (°C)	ASTM D 36-06	-	56,9	57,7	59,4	-	-	-	56,1	57	56,55	
Yumuşama noktasındaki artış (°C)	-	5,7	4	4,5	4,7	4	4,7	4,4	4,4	4,9	3,05	
Depolama stabilitesi deneyi (EN 13399)												
Yumuşama noktası (üst parça)	ASTM D 36-06	-	52,0	52,4	52,9	54,5	57,2	56,2	55,1	53,8	54,5	
Yumuşama noktası (alt parça)	ASTM D 36-06	-	52,4	52,8	52,0	53,7	55,9	55	56,8	54,7	55,8	
Fark (°C)	-	-	0,4	0,4	0,9	0,8	1,3	1,2	1,7	0,9	1,3	

5.1.2.1 Penetrasyon ve Yumuşama Noktası Deney Sonuçları

Bu deneyler RTFOT ile yaşlanma öncesi ve sonrasında saf ve nanomalzemelerle modifiye edilmiş bitümlü bağlayıcı örnekleri üzerinde gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar Tablo 5.1'de verilmiş olup ayrıca Şekil 5.10–5.12'de grafiksel olarak gösterilmiştir. Penetrasyon değeri, bitüm bağlayıcı sertliğinin bir ölçüsüdür. Daha düşük penetrasyon daha sert bağlayıcı demektir. Öte yandan yumuşama noktası, bitümlü bağlayıcıların yüksek sıcaklık performansını temsil etmektedir. Daha yüksek sıcaklık derecelerinde yumuşayan bir bitümlü bağlayıcı, hizmet ömrü sırasında karşılaşılan bu sıcaklık derecelerinde bile nispeten daha iyi performans göstereceğinden tercih sebebidir. Yumuşama noktasındaki artış, aynı zamanda kalıcı deformasyona daha az duyarlı bir bitüm anlamına gelmektedir (Şengöz ve Işıkyakar, 2008).

Şekil 5.10'e göre, saf bitüm ile kıyaslandığında nano-Bentonit katkı içeriğindeki artışla birlikte penetrasyon değerinde azalma görülür, ancak bu çok önemli bir azalma değildir. Nano-Bentonit'in %6 oranında kullanıldığı modifiye bitümlerde penetrasyon değeri en düşüktür, bu durum %6 oranında nano-Bentonit kullanıldığında bağlayıcının nispeten daha sert olduğunu göstermektedir. Diğer taraftan, Şekil 5.13'e bakıldığında, yumuşama noktası değerleri, nano-Bentonit katkı içeriklerdeki artışla biraz artmaktadır. En yüksek nano-Bentonit katkı içeriğinde daha düşük penetrasyon ve daha yüksek yumuşama noktası değerleri elde edilmesinin nedeni nano-Bentonit'in fiziksel durumu olabilmektedir. Nano-Bentonit temel olarak bir dolgu maddesi olduğundan bitüme eklenmesiyle, viskoziteyi artırır ve bu nedenle nispeten daha sert bir bağlayıcı elde edilmektedir. Genel olarak, nanomalzemelerin bitümün penetrasyon ve yumuşama noktası değerleri üzerinde büyük bir etkisi olmadığı görülmüştür.

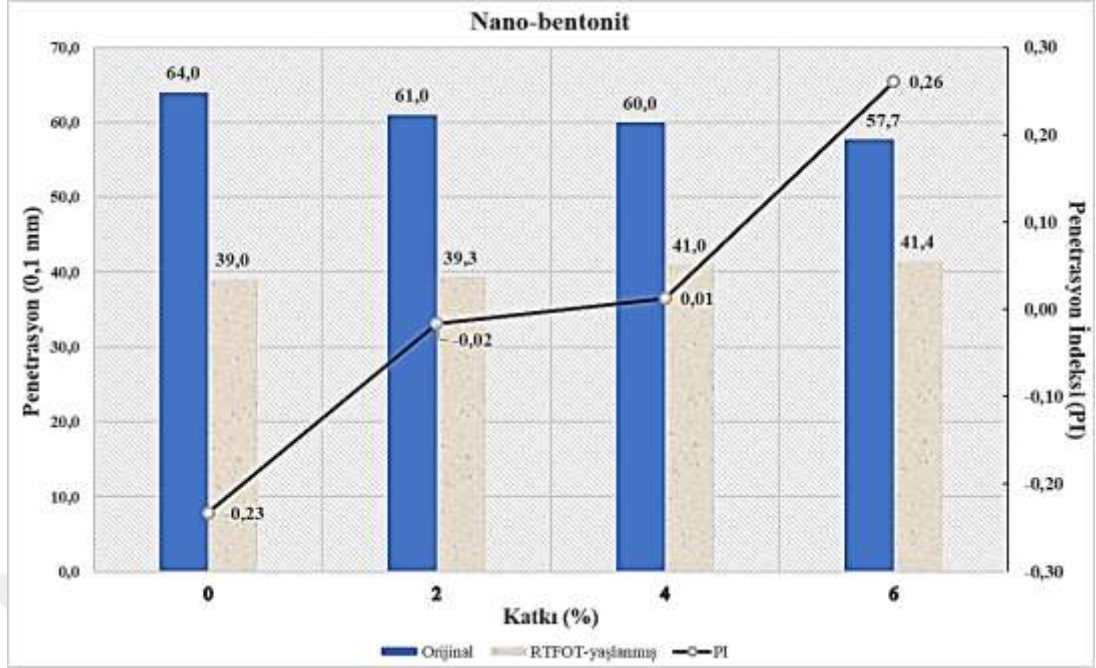
Sıcaklık duyarlılığının bir göstergesi de penetrasyon indeksidir (PI). Penetrasyon indeksi esas olarak penetrasyon ve yumuşama noktası değerlerinin bir fonksiyonudur. Bu indeks, kullanılan nanomalzemelerin bitümlü bağlayıcılar üzerindeki etkisini, sıcaklık duyarlılığına karşı performansları açısından incelemeyi amaçlamıştır. Bitüm bağlayıcılar için PI -2'den +2'ye kadar değişmektedir. Daha yüksek PI değerine sahip bir bağlayıcının sıcaklık duyarlılığı daha düşüktür, bu da sıcaklık değişimlerine karşı

hassasiyet açısından daha iyi performans göstermesi anlamına gelmektedir. Tablo 5.1 ve Şekil 5.10'a bakıldığında, nano-Bentonit içeriğindeki artışla birlikte PI değeri sürekli olarak artmaktadır. Bu sonuç, katkının bağlayıcı üzerindeki pozitif bir etkisi olarak anlaşılmaktadır ve termal olarak kararlı olması beklenir. Bu konu ile ilgili literatürdeki bir çalışmada, yüksek PI değerine sahip bitüm ile hazırlanan asfalt karışımlarının, düşük sıcaklıklarda çatlak oluşumu ve kalıcı deformasyonlara karşı daha dirençli olacağı bildirilmiştir (Şengöz ve Işıkyakar, 2008).

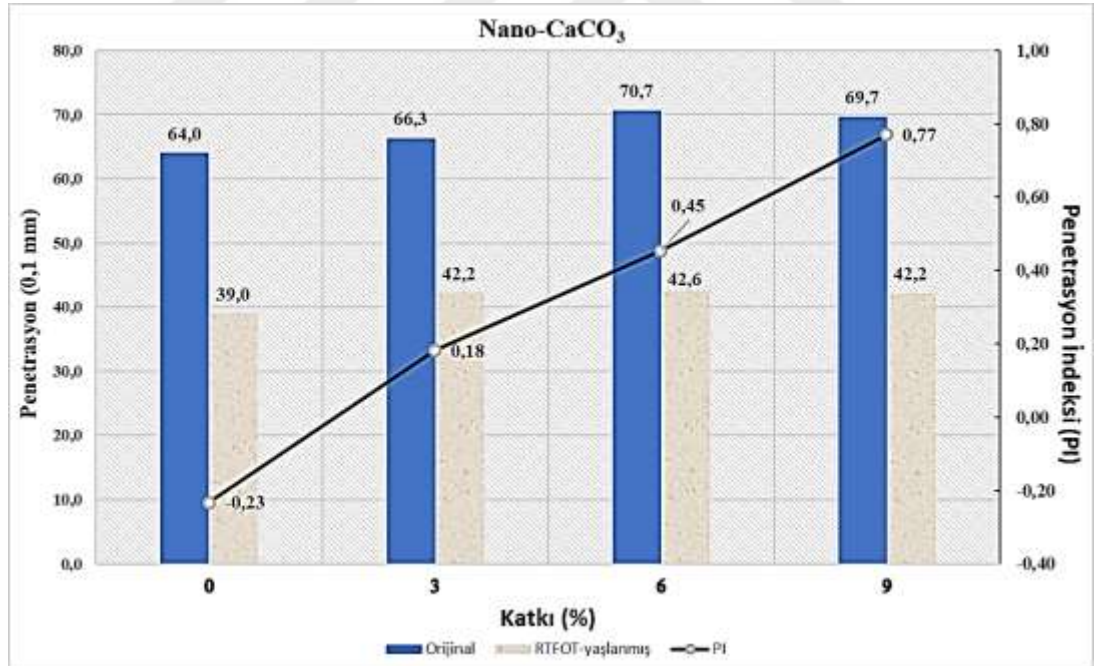
RTFOT yaşlı numuneler, kütle değişimi (uçucu kayıp), kalıcı penetrasyon ve yumuşama noktası değerlerinde artış açısından değerlendirilmiştir. Kütle değişimi, RTFOT sırasında uygulanan yüksek sıcaklıklara ve basınca maruz kaldığı için bitümün uçucu bileşenlerinin buharlaşmasından kaynaklanmaktadır. Bu koşullandırma sonucunda bağlayıcı yaşlanır ve böylece daha sert ve kırılğan bir hale gelir. Sonuç olarak, daha düşük kalıcı penetrasyon ve önemli ölçüde daha yüksek yumuşama noktası değerleri gözlenecektir. Bu sonuçlar incelendiğinde, kısa süreli yaşlanmış nanomodifiye bitümlü bağlayıcılar tatmin edici sonuçlar verdiği görülmektedir.

Tablo 5.1'e göre, nano-Bentonit'in tüm içerikleri için kütle değişimleri limit değerinde kalmış ve %1'i geçmemiştir. Tipik kütle kaybı %0,05 - % 0,5 aralığındadır. Bazı bitümlü bağlayıcı numunelerinde deney sırasında oksidatif ürünler oluşması nedeniyle kütle ağırlığı artabilir (Roberts ve diğ., 1996) ve kütlede artış üzerinde bir sınır yoktur. Bu çalışmada da modifiye nano katkıların bazı içerikleri için kütle artışı meydana gelmiştir.

Şekil 5.10–5.13'deki sonuçlara bakıldığında, nanomalzeme katkılı bitümlü bağlayıcıların kalıcı penetrasyon değerleri saf bitümlü bağlayıcıdan çok farklı değildir. Aynı şey yumuşama noktası artışı için de geçerlidir, çünkü %6 nano-Bentonit içeriği için değerler 57,2°C ila 59,4°C arasında değişmektedir.



Şekil 5.10 Orijinal ve RTFOT-yaşlanmış nano-Bentonit modifiye bitümlü bağlayıcıların penetrasyon deney sonuçları ve penetrasyon indeksi değerleri

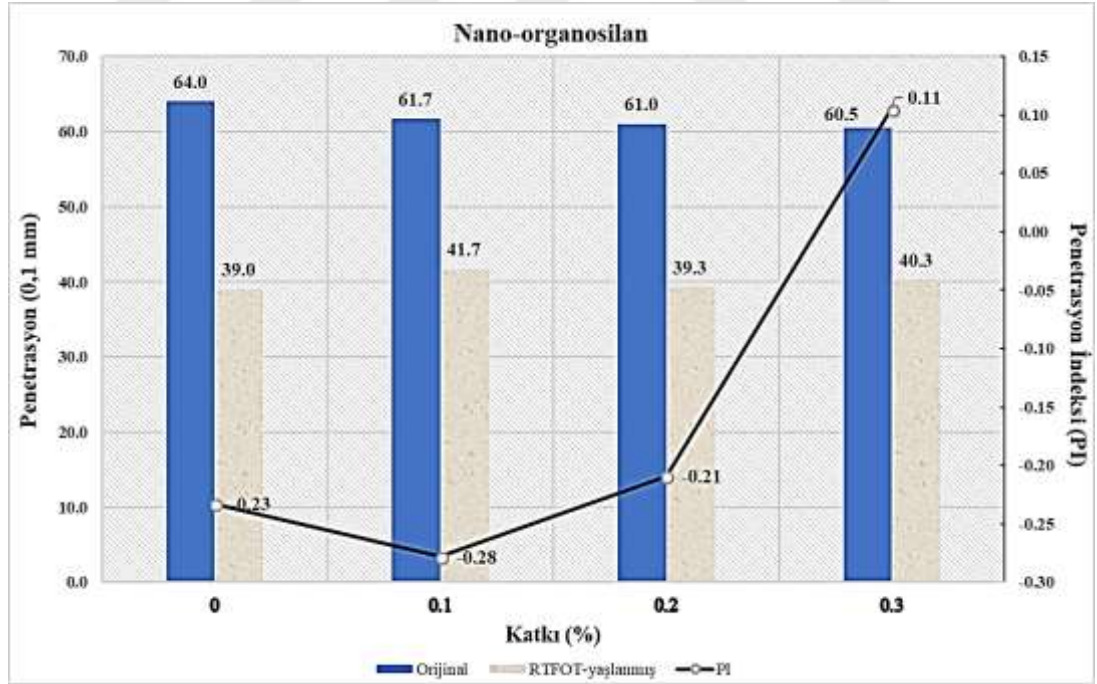


Şekil 5.11 Orijinal ve RTFOT-yaşlanmış nano-CaCO₃ modifiye bitümlü bağlayıcıların penetrasyon deney sonuçları ve penetrasyon indeksi değerleri

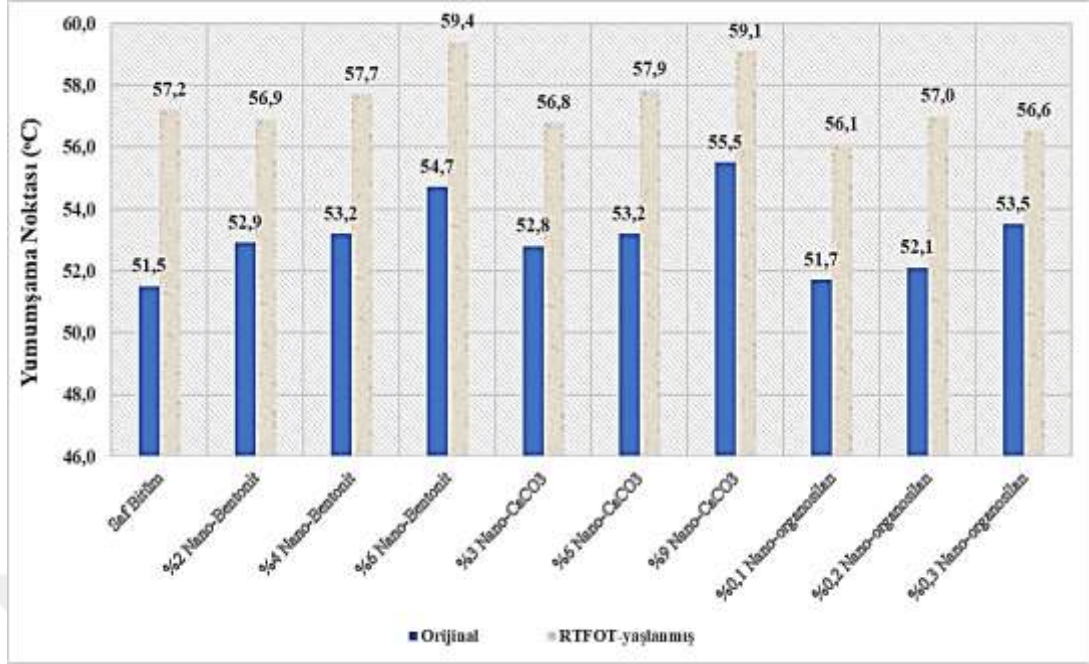
Şekil 5.11'de gösterilen nano-CaCO₃ modifiye bitümlerin penetrasyon deneyi sonuçları, saf bitüm ile karşılaştırıldığında biraz daha azalmaktadır. Penetrasyon

deneyi sonuçları, Hao ve diğ. (2012) tarafından yapılan bir çalışmada elde edilen sonuçlara benzemektedir. En yüksek penetrasyon değeri, nano-CaCO₃ katkısının %6 içeriğinde elde edilmiştir. Yumuşama noktası değerleri ise katkı içeriğinin artması ile birlikte artmaktadır.

Nano-CaCO₃ modifiye bağlayıcı PI açısından nispeten daha iyi sonuçlar göstermiş ve nano-CaCO₃ içeriğinin artışı ile sürekli olarak artmıştır. PI, katkı içeriğinin %9'a çıktığında neredeyse 1 değerine ulaşmıştır. Bu sonuç, yüksek PI değerinin düşük sıcaklık duyarlılığını göstermesi nedeniyle, sıcaklık duyarlılığının önemli olduğu durumlarda çok değerli bir katkı olabileceği sonucuna varılmıştır (Read ve Whiteoak, 2015). Tablo 5.1'de sunulan sonuçlara göre; tüm katkıları için kütle değişimleri sınır değerlerde kalmıştır ve kalıcı penetrasyon değerleri o kadar fazla değişmemiştir. Ancak, saf bitümlü bağlayıcıdan hala daha yumuşaktırlar (modifiye bitüm içeriklerinin saf bitüme göre daha yüksek kalıcı penetrasyon değerleri). Nano-CaCO₃ için yumuşama noktasındaki artışlar da çok az olmuştur.



Şekil 5.12 Orijinal ve RTFOT-yaşlanmış nano-organosilan modifiye bitümlü bağlayıcıların penetrasyon deney sonuçları ve penetrasyon indeksi değerleri



Şekil 5.13 Saf ve nanomodifiye orijinal ve yaşlanmış bitümlü bağlayıcılarda için yumuşama noktası deney sonuçları

Şekil 5.12 ve 5.13'te gösterilen nano-organosilan modifiye bitüm numuneleri için sonuçlar diğer kullanılan iki katkıyla benzer özellikler göstermektedir. Saf bitümlü bağlayıcıya göre penetrasyon değeri %0,1 nano-organosilan için bir miktar azalmıştır ancak diğer iki katkı içeriğindeki artışla artmaktadır. Yumuşama noktası değerleri de nano-organosilan içeriğinin artması ile çok küçük bir artış göstermiştir.

Şekil 5.12'ye bakıldığında, saf bitümlü bağlayıcıya kıyasla PI değeri %0,1 nano-organosilan içeriğinde biraz azalıp diğer iki katkı içeriğinde artmıştır. Tablo 5.1'e istinaden, nano-organosilan modifiye bitümün RTFOT-yaşlanmasından sonra kütle değişimi çok belirgin değildir. Şekil 5.12 ve 5.13 incelendiğinde, kalıcı penetrasyon ve yumuşama noktası değerlerinin artışında önemli bir değişiklik görülmemiştir. Genel olarak, nano-organosilan, bitümün viskozitesini azaltabilmesine rağmen, bağlayıcı maddenin fiziksel özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahip değildir.

5.1.2.2 Depolama Stabilitesi Deney Sonuçları (Geleneksel Yumuşama Noktası Deneyi İle)

Bu deney, daha yüksek depolama sıcaklıklarında tutulduktan sonra, bitüm ve katkı arasındaki faz bağlanma durumu hakkında fikir edinebilmek için nano modifiye katkıları içeren yaşlanmamış bitüm numuneleri üzerinde gerçekleştirilmiştir. Geleneksel yumuşama noktası testi, silindirik kaplardaki numunelerin üst ve alt kısımlarındaki numuneler üzerinde yapılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Tablo 5.1'e göre, modifiye bitüm numunelerinin hiçbiri 2,5°C'lik sıcaklık farkı sınırını aşmamıştır. Depolama stabilitesi açısından kullanılan nanomalzeme arası en iyi sonuç veren ise nano-Bentonit'tir.

Nanomalzemeler genellikle bitümlü bağlayıcı ve katkı maddesi arasında iyi bir bağ oluşturmaya yönelik güçlendirici madde olarak kullanılmaları önerilmektedir. Böylece depolamaya kararlı hale gelebilmektedir. Bu nedenle, özellikle polimer modifiye bitüm (PMB) ve diğer nanokompozitlerin kullanılması durumunda faz ayrışma problemi potansiyel olarak ortadan kalkabilmektedir (Topal ve diğ., 2012).

5.1.2.3 Brookfield Viskozite Deney Sonuçları

Brookfield dönel viskometresi 135°C ve 165°C'de saf ve nanomodifiye bitümlü bağlayıcıların viskozite değerlerini elde etmek için kullanılmıştır. Sonuçlar Tablo 5.1 ve Şekil 5.14'te gösterilmektedir.

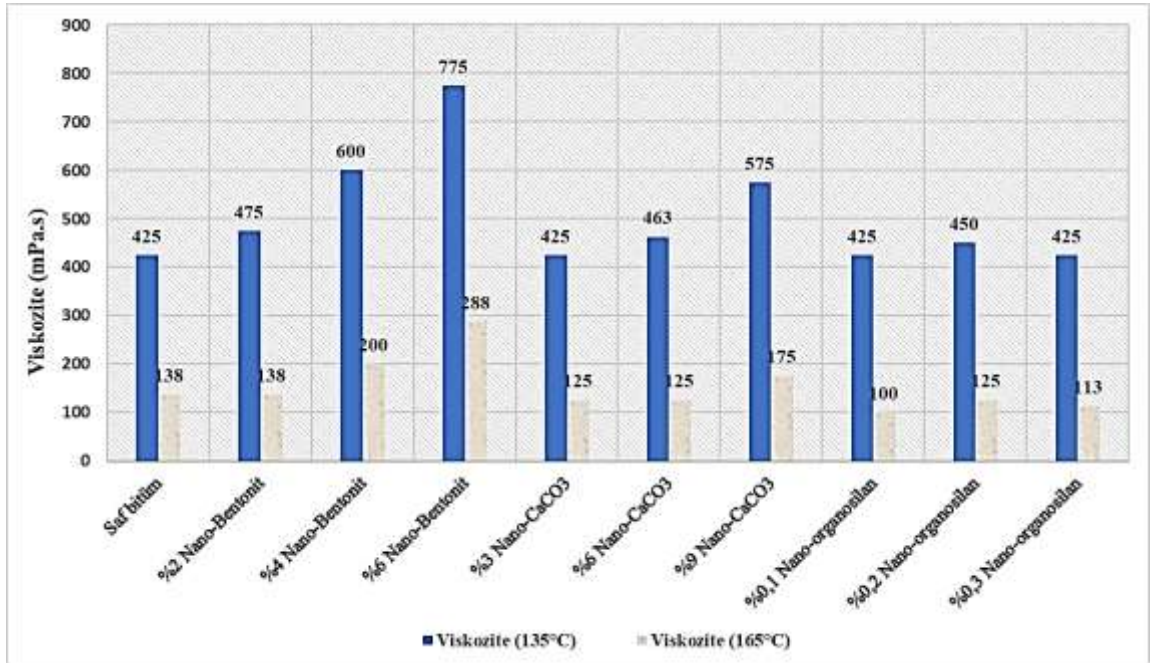
Şekil 5.14'e göre, tüm bitüm numuneleri, 135°C'de elde edilen viskozitelere kıyasla 165°C'lik daha yüksek sıcaklıklarda daha düşük viskoziteler elde edilmiştir. Genel olarak, sıcaklık arttırıldığında viskozite azalmaktadır.

Nano-Bentonit'in bitüme eklenmesiyle, viskozite sürekli olarak artmıştır ve tüm modifiye edilmiş numuneler arasında en yüksek viskozite değerlerine ulaşılmıştır. Bu durum, bitümlü bağlayıcının özellikle % 6 oranında nano-Bentonit içeriği ile çok

viskoz hale geldiğinden işlenebilirliği azalıp yol yapım operasyonlarında nispeten daha yüksek karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları gerektirdiği anlamına gelmektedir. Bu durum, zorlu inşaat koşullarının yanı sıra daha fazla enerji tüketimi ve yüksek maliyet anlamına gelmektedir. Ancak, bir bitüm örneğinin viskozitesi için en yüksek limit 3000 cP'dir ve nano-Bentonit'le modifiye edilmiş bağlayıcılarda viskozite değerleri bu sınır içinde kalmakta olup bu kriteri sağlamaktadır..

Nano-CaCO₃ saf bitümlü bağlayıcıya göre viskoziteyi düşürür ve genel olarak her üç farklı içerik için daha düşük viskoziteye sahiptir. Nano-CaCO₃ katkılı bitümlü bağlayıcılar hazırlanırken karışım sıcaklığını düşürdüğü ve bu sayede potansiyel olarak ekonomik ve çevre dostu kaplamaların hazırlanmasına yardımcı olduğu için verimlilik değerlendirilirken göz önüne alınması gereklidir.

Nano-organosilan, özellikle 135°C'de viskozitenin nispeten azaltılması açısından çok etkili olmuştur. En iyi sonuçlar, viskozitenin 100 cP'ye indirildiği % 0,1 nano-organosilan için elde edilmiştir. Nano-organosilan'ın sıvı halde olması, düşük viskozitelere neden olmaktadır.



Şekil 5.14 Saf ve nanomodifiye bitümlü bağlayıcılar için döneel viskozite deney sonuçları

Nano-organosilan, bağlayıcıların viskozitesini azaltma özelliğine sahip olmasından dolayı ve bu nedenle önemli ölçüde daha düşük sıcaklıklarda karıştırılıp sıkıştırılabildiği için, Ilık Karışım Asfalt (WMA) endüstrisinde yaygın olarak tercih edilmektedir.

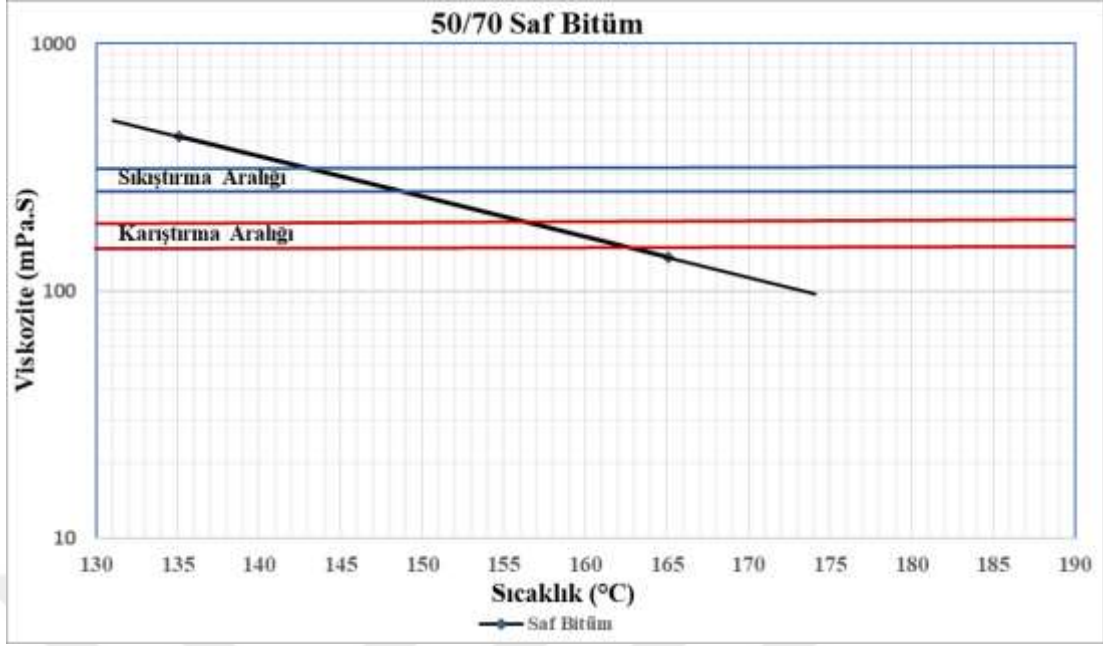
5.1.2.4 Karıştırma ve Sıkıştırma Sıcaklığının Belirlenmesi

Saf ve nano malzeme katkılı bitümler için karıştırma ve sıkıştırma sıcaklık aralıkları Tablo 5.2'de sunulmuştur. Bu aralıklar, eş viskozite yöntemi kullanılarak AASHTO T 316'e göre, karıştırma ve sıkıştırma sıcaklığı için sırasıyla, 170 ± 20 mPa.s ve 280 ± 30 mPa.s'ye karşılık gelen bir yarı-logaritmik viskozite sıcaklık çizelgesi üzerinde grafikleri çizilerek belirlenmektedir. Karıştırma ve sıkıştırma sıcaklık grafiklerini belirlemek için viskozite sıcaklık grafikleri de, Şekil 5.15 - 5.18'de gösterilmiştir.

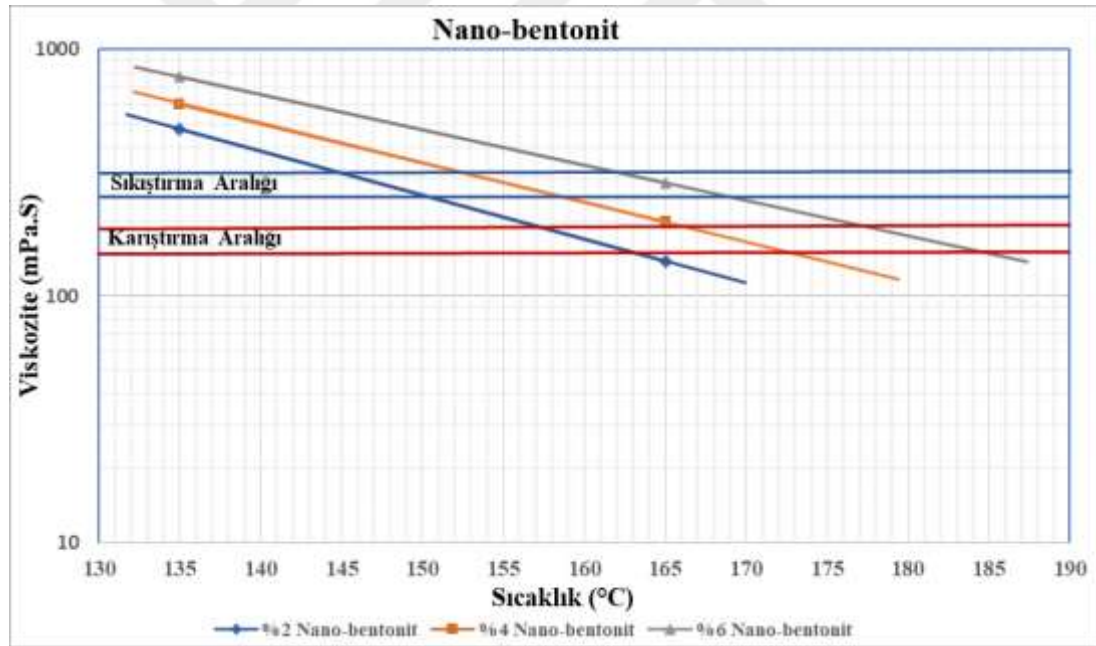
Tablo 5.2 Saf ve nanomodifiye bitümlü BSK'nın karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarının aralıkları

Katkı Tipi	Katkı (%) Bitüm Ağırlığına	Karıştırma Sıcaklığı (°C)	Sıkıştırma Sıcaklığı (°C)
BSK	0	156-163	143-149
Nano-Bentonit	2	157-163	145-151
	4	166-173	153-159
	6	177-185	162-169
Nano-CaCO₃	3	154-161	143-149
	6	155-161	144-150
	9	163-169	150-157
Nano-organosilan	0,1	151-157	141-146
	0,2	155-161	143-149
	0,3	153-159	142-147

Tablo 5.2'de sunulan sonuçlara göre, nano-Bentonit modifikasyonu, bağlayıcıların karıştırma ve sıkıştırma sıcaklığını pek değiştirmemiştir. Ancak % 4 ve % 6 katkı içeriğinde önemli ölçüde yükselmiştir. Karışım sıcaklığı %6 nano-Bentonit içeriğinde 185°C 'ye yükseltilmiş ve tüm modifiye edilmiş numuneler arasında elde edilen en yüksek karıştırma sıcaklığı olmuştur.



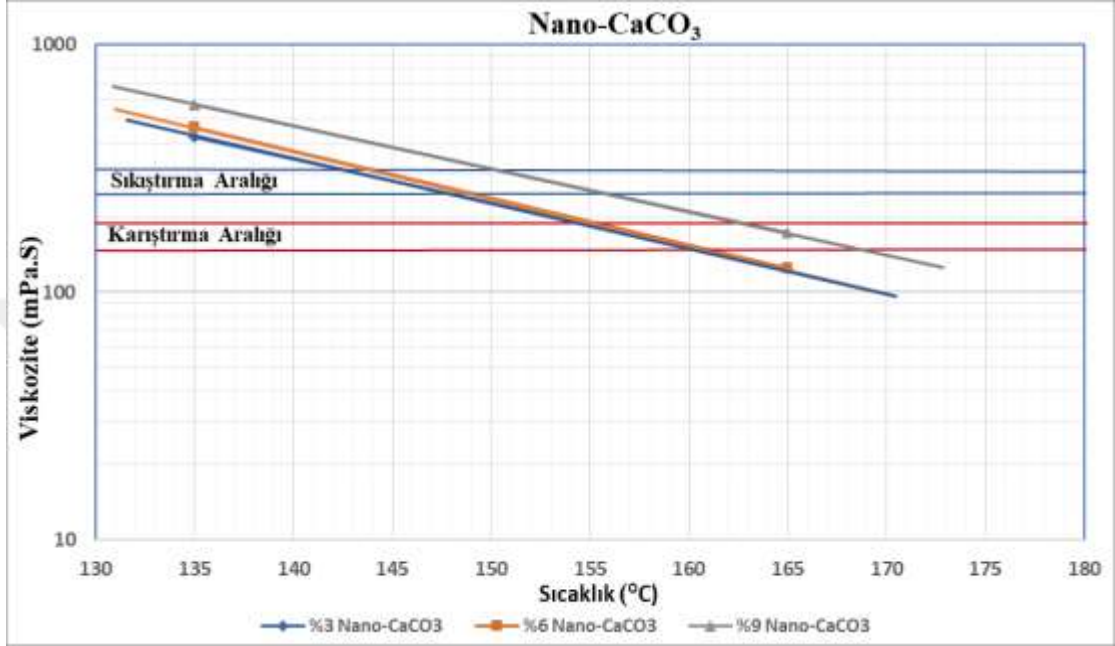
Şekil 5.15 Saf bitüm için viskozite-sıcaklık grafiği



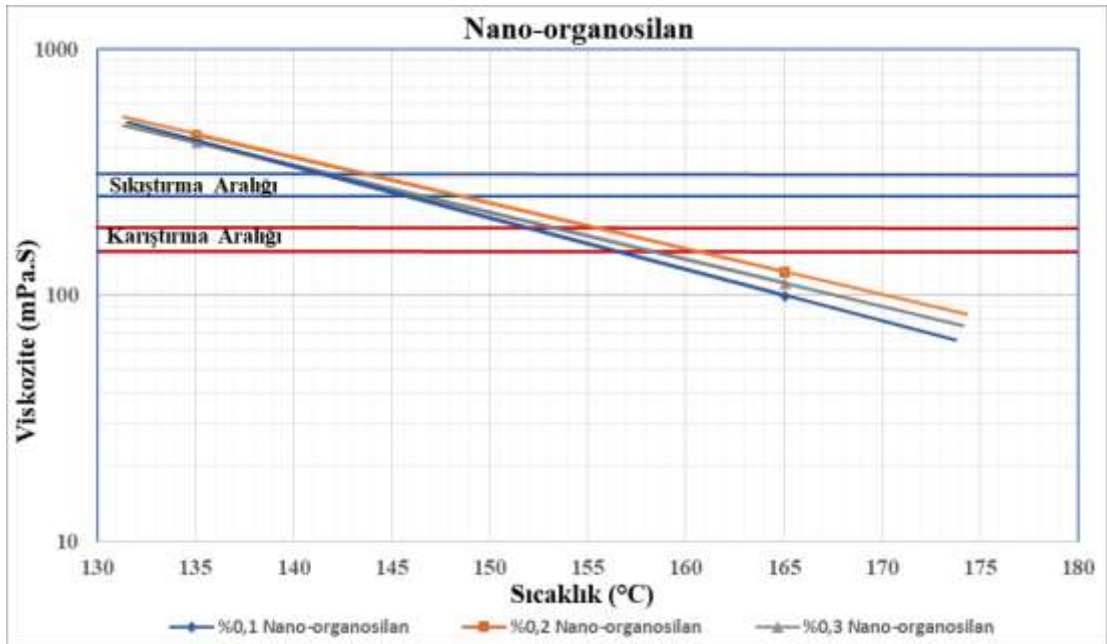
Şekil 5.16 Nano-Bentonit modifiye bitümlü bağlayıcılarda viskozite-sıcaklık grafiği

Nano-CaCO₃, % 3 ve % 6'lık katkı içeriklerinde sıkıştırma ve karıştırma sıcaklıklarını pek değiştirmemiştir. Katkı içeriği % 9'a çıktığında ise bitüm daha viskoz hale gelmiştir. Bu nedenle, karıştırma ve sıkıştırma için gereken sıcaklık, saf bitüm ile karşılaştırıldığında % 9'luk katkı içeriği için daha yüksektir. Nano-organosilan için sonuçlar beklendiği gibi olmuştur. Modifiye edici olarak

kullanılmasının hem karıştırma hem de sıkıştırma sıcaklıklarını düşürdüğü görülmektedir. % 0,1'lik nano-organosilan içeriğinde, karıştırma sıcaklığı 156'dan 151°C'ye düşmüştür, sıkıştırma aralığı için de aynı durum geçerlidir. Bu nedenle, daha önce yapılan pek çok çalışmada % 0,1 nano-organosilan katkı içeriği önerilmiştir.



Şekil 5.17 Nano-CaCO₃ modifye bitümlü bağlayıcılarda viskozite-sıcaklık grafiği



Şekil 5.18 Nano-organosilan modifye bitümlü bağlayıcılarda viskozite-sıcaklık grafiği

5.1.3 Reolojik Deneylerinin Sonuçları

Reoloji deneyleri, saf ve nanomodifiye edilmiş bitümlü bağlayıcılar üzerinde RTFOT ile yaşlandırma öncesi ve sonrasında, DSR cihazı kullanılarak gerçekleştirilen deney sonuçlarını içermektedir. Reoloji deneyleri yapılırken, DSR'nin iki ana parametreyi belirlemesi amaçlanmıştır. Bu parametreler; farklı frekans ve sıcaklıklar için kompleks kesme modülü (G^*) ve faz açısı (δ)'dır.

Bu çalışma için reoloji deneyleri, bitüm karakterizasyonunda kullanılan iki ana sınıflandırmadan, Performans Sınıfı (Performance Grade) ortalama üst (en yüksek) kritik sıcaklığa göre sınıflandırmaya göre yapılmış olup, iki farklı frekans aralığı ve dört farklı sıcaklıktaki reolojik özelliklerdeki değişimler değerlendirilmiştir.

5.1.3.1 PG Ortalama Üst Kritik Sıcaklığı (T_{kritik})

Üst kritik sıcaklık (T_{kritik}), belirli bir bitüm örneğinin kalıcı deformasyona karşı performansını değerlendirmek için bir göstergedir. Bir numune için $G^*/\sin\delta$ değerinin yüksek olması, kalıcı deformasyona karşı daha dirençli olduğu anlamına gelmektedir.

Saf ve nano-modifiye bitümün orijinal ve RTFOT-yaşlı numuneleri, yaklaşık 90 km/saat hızla hareket eden trafiğini temsil eden 10 rad/s'lik (1,59 Hz) bir frekansı koruyan DSR salınımlı kesme deneyine tabi tutulmuştur. Başlangıç sıcaklık değerleri orijinal numuneler için 52°C ve RTFOT-yaşlı numuneler için 64°C olup, DSR cihazı 6°C'lik artışlara ayarlanarak deneyler tekrarlanmıştır.

PG sınıflandırma sisteminde kullanılan üst kritik sıcaklıklar, her bir numune için $G^*/\sin\delta$ değerleri elde ederek belirlenmiştir. Ölçüt, Tablo 4.9'da verilen PG Superpave sistemi için DSR şartnamesinde belirtilmiştir. Bu standarta göre, orijinal ve RTFO-yaşlı numuneler için $G^*/\sin\delta$ minimum değerleri sırasıyla 1000 Pa ve 2200 Pa'dır (Pavement Interactive, 2012e). Saf ve nano modifiye edilmiş bitüm numuneleri için üst kritik sıcaklık deney sonuçları Tablo 5.3'te verilmiştir.

Tablo 5.3 Saf ve nanomodifiye bitümlü bağlayıcılarda PG üst kritik sıcaklık sınıflarının saptanması

Bağlayıcı Tipi	Katki (%)’si	Sıcaklık (°C)	DSR, G*/Sinδ (Pa)		Üst Kritik Sıcaklık T _{kritik} (°C)
			Orijinal	RTFOT-yaşlı	
Saf Bitüm	0	52	7652		64
		58	3074		
		64	1385	2857	
		70	644,5	1328	
Nano-Bentonit	2	52	7723		64
		58	3370		
		64	1549	3291	
		70	739,6	1532	
	4	52	9576		64
		58	4183		
		64	1931	4518	
		70	924,6	2119	
	6	52	10970		70
		58	4839		
		64	2248	5523	
		70	1072	2500	
76		577,8	1242		
Nano-CaCO ₃	3	52	9895		64
		58	4300		
		64	1830	4285	
		70	843,7	2020	
	6	52	8245		64
		58	3567		
		64	1578	4011	
		70	787,4	1837	
	9	52	12950		70
		58	5509		
		64	2459	5753	
		70	1132	2710	
76		574	1304		
Nano-organosilan	0,1	52	6910		64
		58	3105		
		64	1382	3445	
		70	661,1	1529	
	0,2	52	7494		64
		58	3310		
		64	1634	3301	
		70	721,6	1470	
	0,3	52	7332		64
		58	3213		
		64	1443	3299	
		70	683,1	1502	

Tablo 5.3 incelendiğinde, sıcaklık artışı ile tekerlek izi parametresinin ($G^*/\sin\delta$) eşit şekilde düştüğü gözlemlenmektedir. Bu sonuçlardan, sıcaklık artışı ile bağlayıcı performansının tekerlek izine direnç açısından olumsuz etkilendiği ve kalıcı deformasyona yatkın hale geldiği anlaşılmaktadır (Read ve Whiteoak, 2015).

Bu çalışmada kullanılan nanomalzemelerin, PG kritik üst sıcaklık (T_{kritik}) değerlerini yükselterek bağlayıcının kalıcı deformasyona karşı performansını arttırmak açısından belirli bir etkisi olmadığı görülmüştür. Sadece %6 nano-Bentonit ve %9 nano- $CaCO_3$ modifiye bitüm örnekleri, $64^\circ C$ 'den $70^\circ C$ 'ye kadar yükselmiş ve yüksek sıcaklığa karşı en dayanıklı olan bitümlü bağlayıcılar sayılmaktadır. Bu nedenle, nano malzemelerin, bitüm bağlayıcıların kalıcı deformasyona karşı direncinin artırılmasında çok etkili olmadığı söylenebilir. Ancak sıfır kesme viskozitesi (ZSV) veya MSCR gibi deneyler ile daha üst değerlendirmeler yapılabilmektedir.

PG üst kritik sıcaklık değerlerin sonuçlarına genel olarak baktığımızda, orijinal ve RTFOT-yaşlı örneklerin $G^*/\sin\delta$ değerleri aynı PG sınıfta kalmaktadır. Bu, nano modifiye RTFOT-yaşlı örneklerin genellikle daha yavaşça sertleşmesini ifade etmektedir.

5.1.3.2 Farklı Frekans ve Sıcaklıklarda Bitümün Reolojik Karakterizasyonu

Bu deneyin asıl amacı, yükleme süresinin ve bitümlü bağlayıcının üretim ve serme işlemi sırasında yaşayacağı farklı sıcaklık koşullarının etkisini değerlendirmektir. Tüm orijinal ve RTFOT-yaşlı saf ve modifiye bitüm numuneleri, 0,01 ve 10 Hz frekanslarında salınan salınımlı kesme ve $10^\circ C$ artışla 50 ila $80^\circ C$ arasında değişen 4 farklı sıcaklıkta deneye tabi tutulmuştur. Orijinal ve RTFOT yaşlı numunelere ait deney sonuçları sırasıyla Tablo 5.4 ve 5.5'te özetlenmiştir.

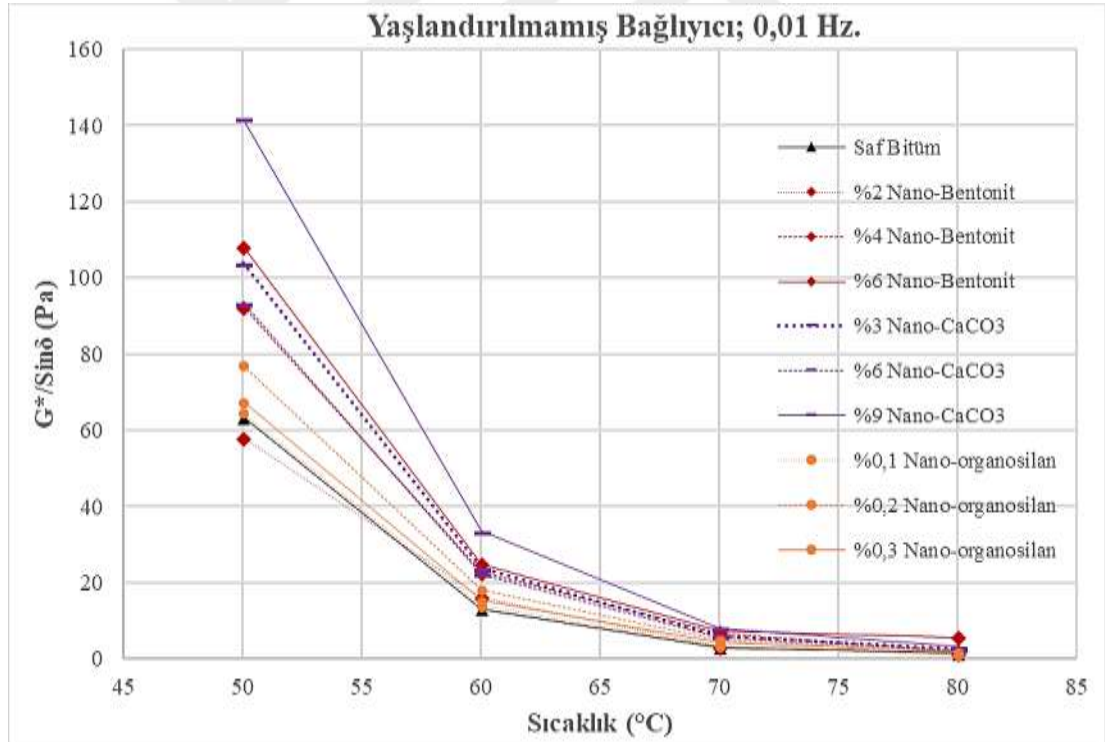
Orijinal bitüm örnekleri için sonuçların RTFO-yaşlı örnek sonuçlarıyla birlikte sunulmasının amacı, bağlayıcının davranışı üzerinde yaşlanmanın etkisini anlamak ve orijinal örneklerin sonuçlarını referans olarak kullanmaktır.

Tablo 5.4 Yaşlandırılmamış bağlayıcılar için farklı frekans ve sıcaklıklardaki reolojik deney sonuçları

Yaşlandırılmamış Bitümlü Bağlayıcılar									
Bağlayıcı Tipi	Katkı Maddesi (%)	Frek. (Hz.)	Sıcaklık (°C)	Faz Açısı (δ)	G*/sinδ (Pa)	Frek. (Hz.)	Sıcaklık (°C)	Faz Açısı (δ)	G*/sinδ (Pa)
Saf Bitüm	0	0,01	50	87,03	63,51	10	50	82,73	54610
			60	86,86	13,18		60	85,83	13730
			70	85,5	3,016		70	87,67	3838
			80	82,45	1,45		80	88,61	1281
Nano-Bentonit	2	0,01	50	89,3	58,09	10	50	81,99	51740
			60	88,91	16,24		60	85,59	16080
			70	87,32	3,177		70	87,88	3817
			80	85,52	1,402		80	88,26	1276
	4	0,01	50	88,56	92,37	10	50	80,82	75420
			60	88,79	22,67		60	84,58	20780
			70	85,5	6,547		70	86,45	6362
			80	86,68	1,965		80	88	2222
	6	0,01	50	88,84	108,3	10	50	80,2	86230
			60	88,12	24,92		60	84,18	22350
			70	84,93	7,297		70	85,8	6874
			80	45,43	5,786		80	86,06	2463
Nano-CaCO ₃	3	0,01	50	87,83	103,9	10	50	81,24	78570
			60	88,77	23,8		60	84,86	20940
			70	80,93	6,108		70	86,77	5709
			80	72,84	2,637		80	84,99	1803
	6	0,01	50	86,44	93,48	10	50	81,72	66190
			60	87,91	22,21		60	84,95	17650
			70	88,9	5,686		70	86,67	5125
			80	82,48	2,302		80	85,68	1631
	9	0,01	50	85,26	141,8	10	50	79,53	94900
			60	89,24	33,45		60	83,26	27770
			70	86,72	8,13		70	85,81	6947
			80	84,05	3,188		80	86,69	2407
Nano-organosilan	0,1	0,01	50	87,99	64,7	10	50	82,35	57290
			60	89,8	14,03		60	85,73	14680
			70	82,66	3,311		70	87,78	4199
			80	86,17	1,183		80	88,55	1420
	0,2	0,01	50	86,97	77,04	10	50	82,06	57840
			60	86,72	18,23		60	85,02	15530
			70	87,55	4,996		70	86,94	4521
			80	82,08	1,831		80	87	1571
	0,3	0,01	50	88,67	67,56	10	50	82,24	58630
			60	87,49	15,35		60	85,67	15010
			70	85,11	4,262		70	86,95	4454
			80	85,53	1,839		80	88,89	1523

Düşük (0,01 Hz) ve yüksek (10 Hz) frekanslarda varyasyonu görmek için tüm numunelerin $G^*/\sin\delta$ değerleri ile seçilen sıcaklıklar arasındaki korelasyon Şekil 5.19 ila 5.22'de gösterilmiştir.

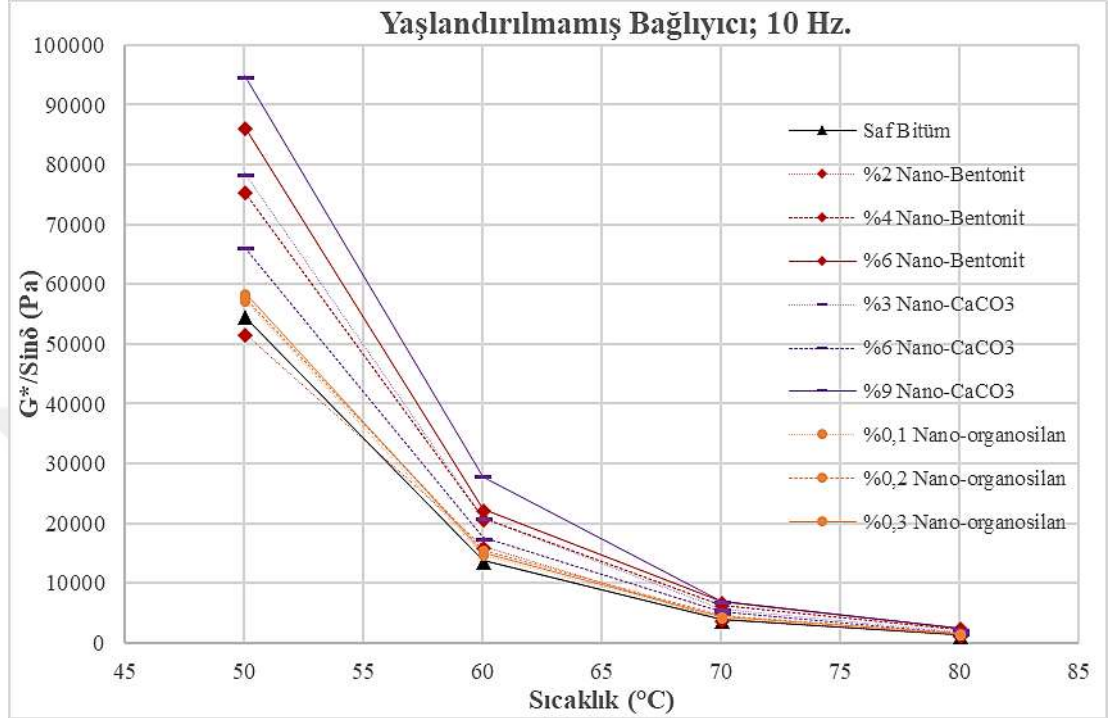
Şekil 5.19 - 5.22'de görüldüğü gibi, tüm bitüm numuneleri, kalıcı deformasyona karşı performans ($G^*/\sin\delta$) açısından benzer eğilim göstermiştir. $G^*/\sin\delta$ değerleri her iki frekansta da sıcaklıktaki azalma ile birlikte artmıştır. $G^*/\sin\delta$ değerindeki bir artış, kalıcı deformasyona karşı daha iyi performans anlamına gelmektedir. Daha düşük sıcaklıklarda, tüm numunelerin kalıcı deformasyona karşı direnci yüksektir. Ayrıca, beklendiği gibi, tüm bitüm numuneleri için $G^*/\sin\delta$ değerleri yüksek bir frekansta (10 Hz) artmaktadır. Bu durum, bitümün reolojik davranışından dolayı, daha kısa yükleme süreleri (yüksek frekanslı) altında bitümün elastik davranışını göstermektedir (Read ve Whiteoak, 2015; Şengöz ve diğ., 2013).



Şekil 5.19 0,01 Hz'deki yaşlandırılmamış, saf ve nanomodifiye numuneler için $G^*/\sin\delta$ değerleri

Şekil 5.19 ve 5.20'ye göre, düşük frekansta saf ve nanomodifiye bağlayıcılar, düşük $G^*/\sin\delta$ değerler ile sonuçlanmıştır. Çünkü bitümlü bağlayıcılar, yükün yavaş uygulanması durumunda viskoz davranış göstermektedir. Tam tersine, daha yüksek bir

frekansta (10 Hz), tüm numuneler özellikle daha düşük sıcaklıklarda elastik şekil değişimi yaptığından, daha yüksek $G^*/\sin\delta$ değerleri vermiştir.



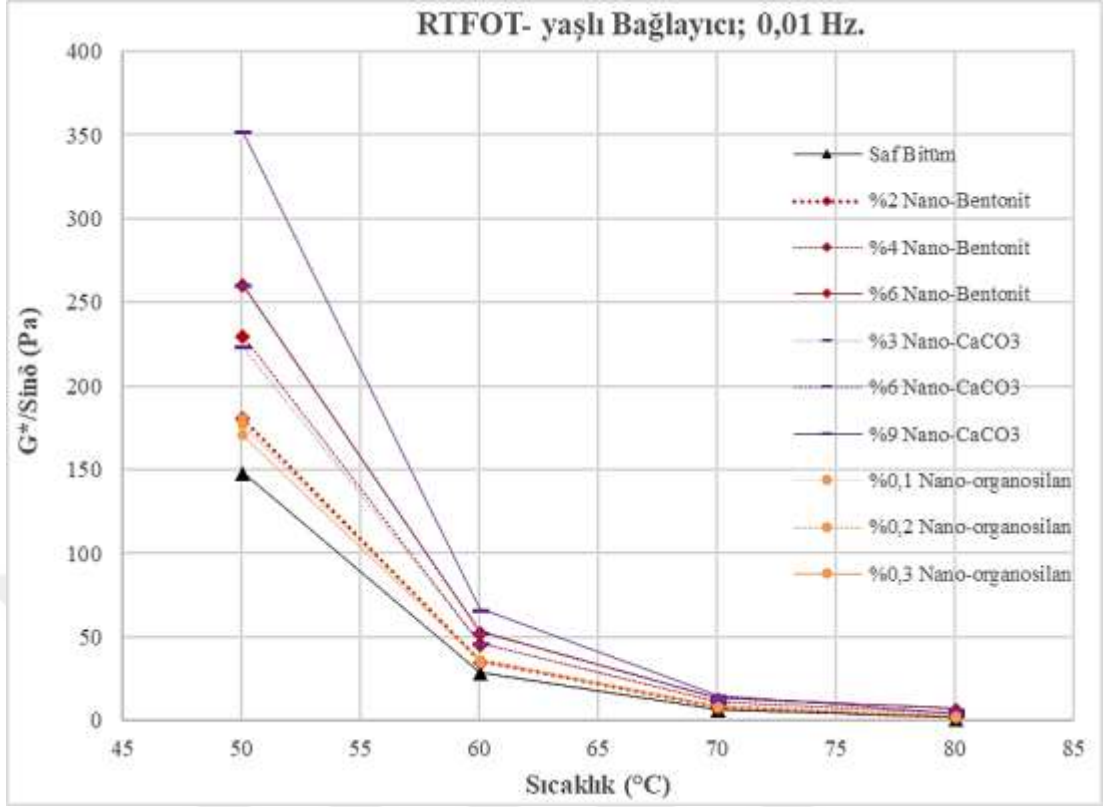
Şekil 5.20 10 Hz'deki yaşlandırılmamış, saf ve nanomodifiye numuneler için $G^*/\sin\delta$ değerleri

Nano-CaCO₃ modifiye bağlayıcılar, tekerlek izi parametresi açısından ümit verici sonuçlar vermiştir. Her iki frekansta, özellikle de %9 nano-CaCO₃ katkı içeriğindeki tüm sıcaklık değerlerinde en yüksek $G^*/\sin\delta$ değerleri elde edilmiştir. $G^*/\sin\delta$ 'deki bu artış, muhtemelen bir dolgu maddesi gibi toz boyutundaki katkı olan nano-CaCO₃'den kaynaklanmaktadır. Burada elde edilen nano-CaCO₃ sonuçları, penetrasyon indeksi (PI) ile değerlendirilen sonuçlarla uyşmaktadır.

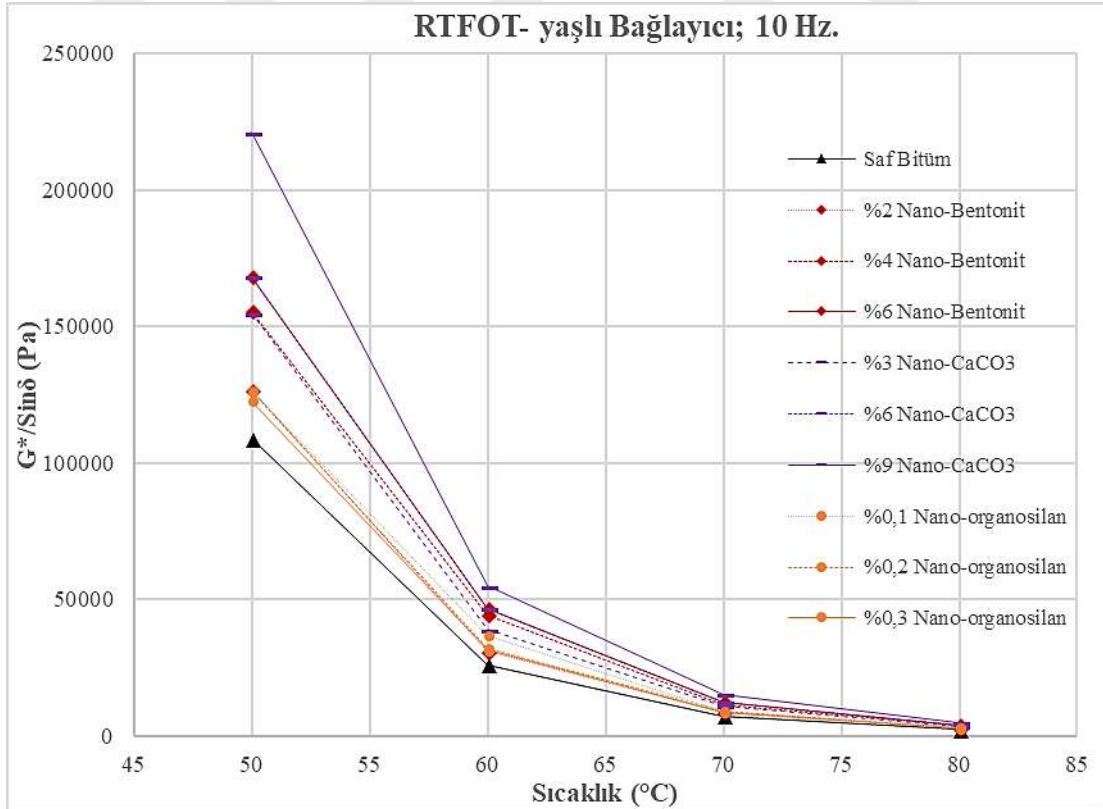
%2 nano-Bentonit, özellikle düşük sıcaklıkta $G^*/\sin\delta$ yönünden tatmin edici sonuçlar vermese de, %4 ve %6 nano Bentonit ile bitümün modifikasyonu $G^*/\sin\delta$ değerlerini iyileştirmiştir. Saf bitümlü bağlayıcıdan önemli ölçüde daha yüksek değerler vermektedir. Nano-organosilan'ın diğer iki kullanılan modifiye edici katkı ile karşılaştırılması, modifiye edilmiş bağlayıcıların tekerlek izine karşı iyileştirilmesinde önemli bir etkiye sahip olmamıştır ve sonuçta elde edilen $G^*/\sin\delta$ değerleri, hem düşük hem de yüksek frekanslarda saf bağlayıcılarla karşılaştırıldığında daha yüksektir.

Tablo 5.5 Yaşlandırılmış bağlayıcılar için farklı frekanslar ve sıcaklıklardaki reolojik deney sonuçları

RTFOT ile Yaşlandırılmış Bitümlü Bağlayıcılar									
Bağlayıcı Tipi	Katkı Maddesi (%)	Frek. (Hz.)	Sıcaklık (°C)	Faz Açısı (δ)	G*/sinδ (Pa)	Frek. (Hz.)	Sıcaklık (°C)	Faz Açısı (δ)	G*/sinδ (Pa)
Saf Bitüm	0	0,01	50	89,43	148,5	10	50	77,82	108800
			60	88,38	29,07		60	82,55	25990
			70	89,26	6,91		70	86,02	7295
			80	88,78	1,948		80	87,84	2323
Nano-Bentonit	2	0,01	50	89,24	181	10	50	77,01	126800
			60	89,02	35,42		60	82,13	30910
			70	85,98	8,197		70	85,36	8574
			80	89,67	2,462		80	87,91	2770
	4	0,01	50	88,36	230,5	10	50	75,58	155500
			60	89,19	46,38		60	80,71	44330
			70	87,5	11,29		70	84,61	11250
			80	88,74	4,212		80	86,55	3752
	6	0,01	50	88,72	261,1	10	50	74,99	168300
			60	88,27	53,03		60	83,41	46600
			70	84,95	13,21		70	83,86	12460
			80	67,34	7,274		80	86,01	4053
Nano-CaCO ₃	3	0,01	50	88,71	223,8	10	50	76,08	155000
			60	87,78	46,77		60	81,43	38840
			70	83,9	11,22		70	84,85	10900
			80	79,87	4,001		80	86,73	3506
	6	0,01	50	88,72	261,1	10	50	74,99	168300
			60	88,27	53,03		60	83,41	46600
			70	84,95	13,21		70	83,86	12460
			80	67,34	7,274		80	86,01	4053
	9	0,01	50	88,81	352,7	10	50	73,23	221000
			60	89,24	66,93		60	79,99	54930
			70	89,87	15,41		70	83,72	15160
			80	88,47	4,427		80	86,79	4897
Nano-organosilan	0,1	0,01	50	89,21	181,1	10	50	76,85	126300
			60	89,68	37,07		60	81,66	36900
			70	89,47	8,927		70	84,66	8960
			80	86,21	2,393		80	87,74	2891
	0,2	0,01	50	89,18	177,3	10	50	76,98	126600
			60	89,26	36,12		60	81,97	32200
			70	87,48	8,8		70	85,61	9054
			80	86,33	2,84		80	86,93	2913
	0,3	0,01	50	89,03	171,4	10	50	77,1	122700
			60	88,88	35,5		60	81,96	31320
			70	87,94	8,468		70	85,19	8646
			80	85,81	2,938		80	86,94	2942



Şekil 5.21 0,01 Hz'deki RTFOT-yaşlı, saf ve nanomodifiye numuneler için $G^*/\sin\delta$ değerleri



Şekil 5.22 10 Hz'deki RTFOT-yaşlı, saf ve nanomodifiye numuneler için $G^*/\sin\delta$ değerleri

Nano-organosilan, bitümün viskozitesini düşürür ve sıvı halde bulunmaktadır. Bu özellik, kalıcı deformasyona karşı performansını iyileştirmek açısından diğer katkıları nispeten daha az etkili olmuştur. Burada gözlemlenen bir başka eğilim, modifiye edici katkı içeriğinin artması ile özellikle düşük sıcaklıklarda uygulanan frekansların her biri için, kalıcı deformasyona karşı performansının büyük ölçüde artmasıdır.

Şekil 5.21 ve 5.22'den elde edilen sonuçların, yaşlandırılmamış numuneler için elde edilen sonuçlara oldukça benzer olduğu gözlenmiştir. Beklenildiği üzere, $G^*/\sin\delta$ değerleri, her iki frekansta da yaşlanmanın (bağlayıcının oksitlenmesi ve dolayısıyla sertleşmesi) etkisine bağlı olarak büyük ölçüde daha yüksektir.

Nano-organosilan modifiye bağlayıcının kısa süreli yaşlanma performansının, kalıcı deformasyona karşı direnç açısından daha iyi olduğu görülmekte ve tüm sıcaklık döngüsü için düşük ve yüksek frekanslarda saf bağlayıcıya kıyasla daha yüksek $G^*/\sin\delta$ değerleri ile sonuçlanmaktadır.

Genel olarak bitümlü bağlayıcının kalıcı deformasyona karşı performansının geliştirilmesi, nanomalzemelerle modifikasyon ile sağlanabileceği sonucuna varılmıştır. Nano malzemelerle modifikasyonun etkisi, tekerlek izi ve diğer bazı mekanik deneyler gerçekleştirilerek incelenebilmektedir.

5.2 Asfalt Karışımları Üzerinde Uygulanan Deneylerin Sonuçları

Bu bölümde, saf ve nanomodifiye bağlayıcılarla hazırlanan bitümlü karışımlar üzerinde yapılan deneylerin sonuçları sunulmuştur. Çalışma kapsamında öncelikle, farklı oranlarda üç farklı tip katkı ile hazırlanan her bir karışım için optimum bitüm içerikleri, Marshall karışım tasarım metodunu uygulayarak gerçekleştirilmektedir. Bunu takiben, Modifiye Lottman deneyi (AASHTO T283) sonuçları sunulurken elde edilen sonuçlar hakkında ayrıntılı tartışmalar yapılmıştır.

5.2.1 Marshall Karışım Tasarımı Sonuçları ve Optimum Bitüm İçeriklerin Belirlenmesi

Bu çalışmada, asfalt karışımlarının hazırlanması için, Tip-1 gradasyonlu yoğun dereceli kireçtaşı kullanılmıştır. Saf ve nanomodifiye bitüm numuneleri ile bitümlü karışımlarının hazırlanması için Marshall karışım tasarımı (ASTM D 1559) yöntemi kullanılmıştır.

Optimum bitüm içeriğinin bulunması için Marshall numuneleri agrega ağırlığına %3,5, %4, %4,5, %5 ve %5,5 oranında bitüm içeriği ile dökülmüştür. Daha önce belirlenen karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarında numunenin her iki tarafına 75 Marshall kompaktör darbesi uygulanarak her bir bitüm içeriği için üçer briket dökülmüştür.

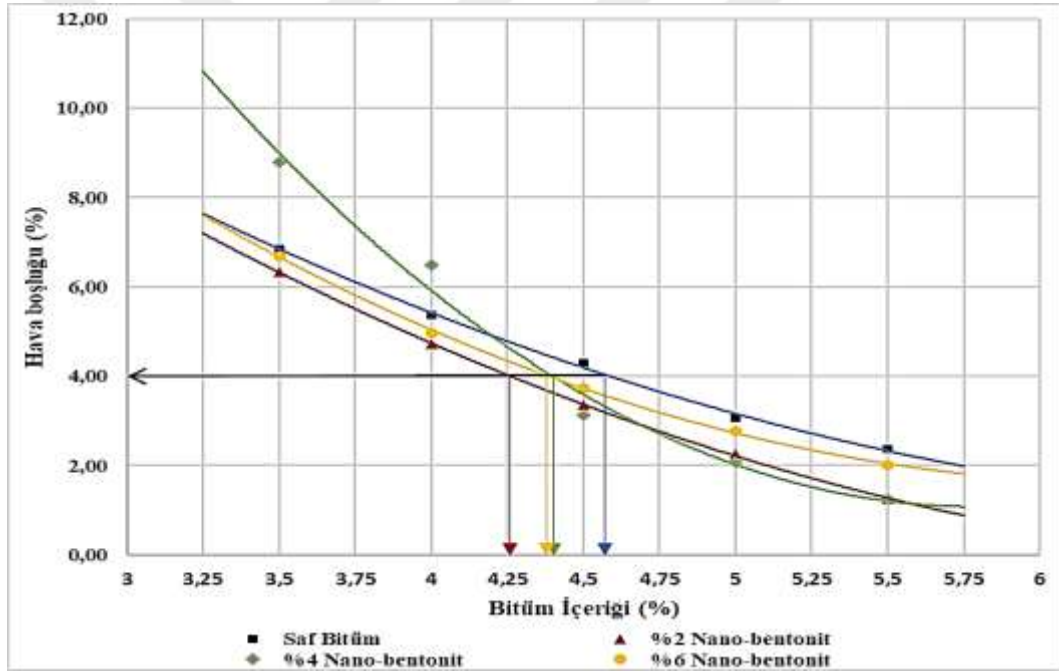
Çalışma kapsamında toplam on farklı asfalt karışımı hazırlanmıştır. Üretilen Marshall briketleri üzerinde hacimsel analizler yapıldıktan sonra, numuneler 35±5 dakika boyunca 60°C'de suya batırılmış, Marshall stabilite ve akma değerleri Marshall stabilite cihazı kullanılarak ölçülmüştür. Maksimum teorik özgül ağırlık deneyi, karışımdaki maksimum hava boşlukları hakkında bilgi sağlamak için her bir farklı karışım için gevşek karışım numuneleri üzerinde gerçekleştirilmiştir.

Her bir Marshall karışımı için tüm hacimsel hesaplamalar yapıldıktan sonra, aşağıdaki grafikler geliştirilmiştir:

- Yığın yoğunluğu (gr /cm³) - Bitüm içeriği (%)
- Stabilite (kgf) - Bitüm içeriği (%)
- Akma (mm) - Bitüm içeriği (%)
- Mineral agregadaki boşluklar (VMA) % - Bitüm içeriği (%)
- Bitümlü dolu boşluklar (VFA) % - Bitüm içeriği (%)
- Hava boşluğu % - Bitüm içeriği (%)

Marshall numuneleri ile ilgili deney sonuçları, tüm hesaplamalar ve ilgili grafikler için, **Ek 1**'e bakılabilir.

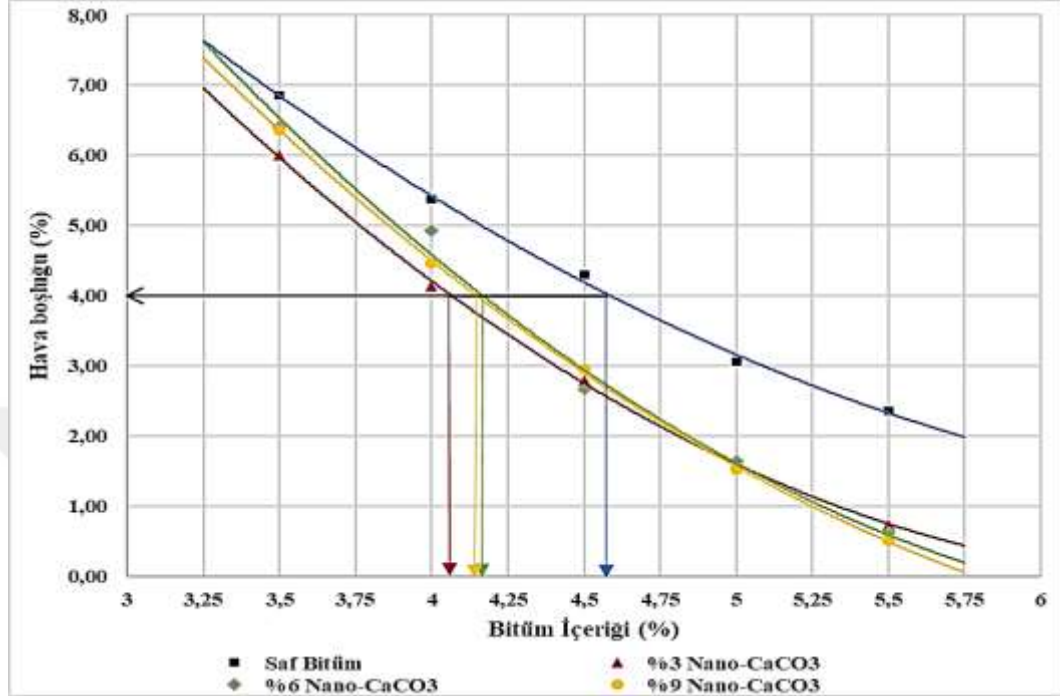
Bu çalışmada kullanılan her katkı tipi ve oranı için ayrı karışım tasarımının gerçekleştirilmesinin nedeni, söz konusu modifiye edici katkının optimum bitüm içeriğinin varyasyonları üzerindeki etkisini görmektir. Ek olarak, istenen niteliklere sahip bir karışım üretmek için optimum bağlayıcı oranının seçilmesine yardımcı olmaktadır. Optimum bitüm içeriği, saf ve nanomodifiye edilmiş bağlayıcılar (bitüm ağırlığı ile eklenen farklı modifiye edicilerin oranları) ile hazırlanan karışımlar için geliştirilmiş grafiklerden %4 hava boşluğa karşılık gelen değer olarak elde edilmektedir (Şekil 5.23 - 5.25).



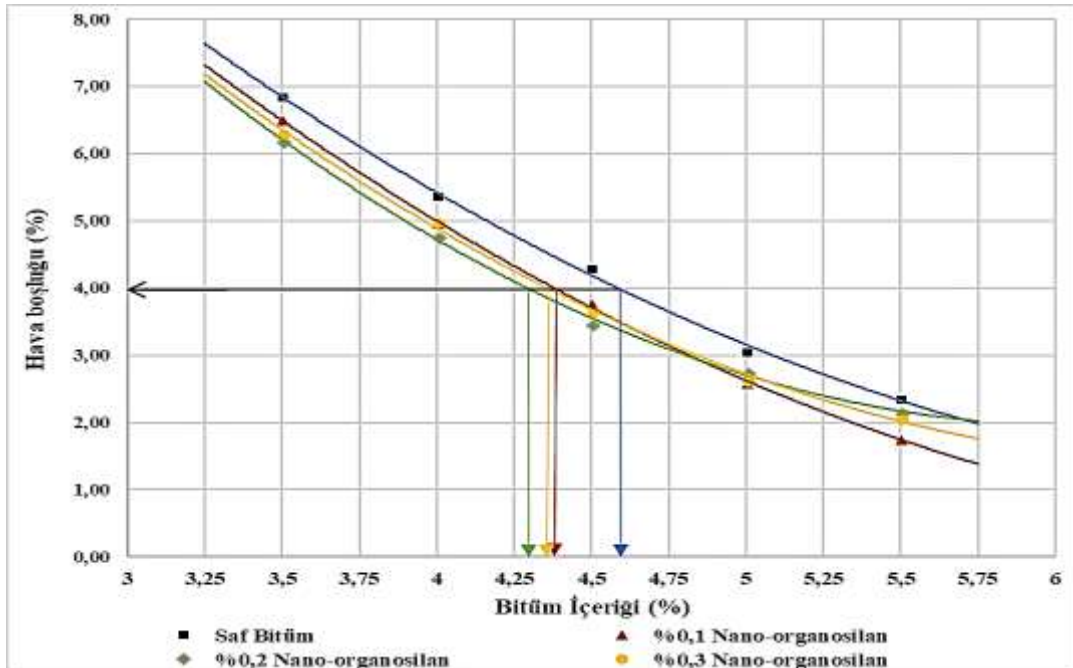
Şekil 5.23 Nano-Bentonit modifiye asfalt karışımları için %4 hava boşluğuna karşılık gelen optimum bitüm içeriğinin belirlenmesi

%4 hava boşluğu, Karayolları Teknik Şartnamesinde aşınma tabakası için belirlenen sınırlar (%3-5) arasındaki ortalama değerdir. Superpave tasarım yönteminde optimum bitüm içeriğinin belirlenmesi için aynı kriteri önermektedir. Optimum bitüm içeriğinin belirlenmesinden sonra, elde edilen değerler diğer Marshall parametreleri için tekrar kontrol edilmiştir (Tablo 4.10). Elde edilen sonuçlara göre, herbir karışım

için optimum bitüm içeriği kriterleri karşılamış ve Karayolları Teknik Şartnamesinde belirlenen sınırlar içinde kalmıştır (KTSŞ, 2013).



Şekil 5.24 Nano-CaCO₃ modifiye asfalt karışımları için %4 hava boşluğuna karşı gelen optimum bitüm içeriğinin belirlenmesi



Şekil 5.25 Nano-organosilan modifiye asfalt karışımları için 4 hava boşluğuna karşılık gelen optimum bitüm içeriğinin belirlenmesi

Optimum bitüm içeriklerine karşılık gelen diğer Marshall parametreleri için sonuçlar Tablo 5.6'da sunulmuştur.

Şekil 5.26 ve Tablo 5.6'ya bakıldığında, nano-modifiye bitüm ile hazırlanan tüm karışımların, kontrol karışımına (saf bitümlü bağlayıcı ile hazırlanan karışım) kıyasla daha düşük optimum bağlayıcı içeriğine sahip olduğu açıkça görülmektedir.

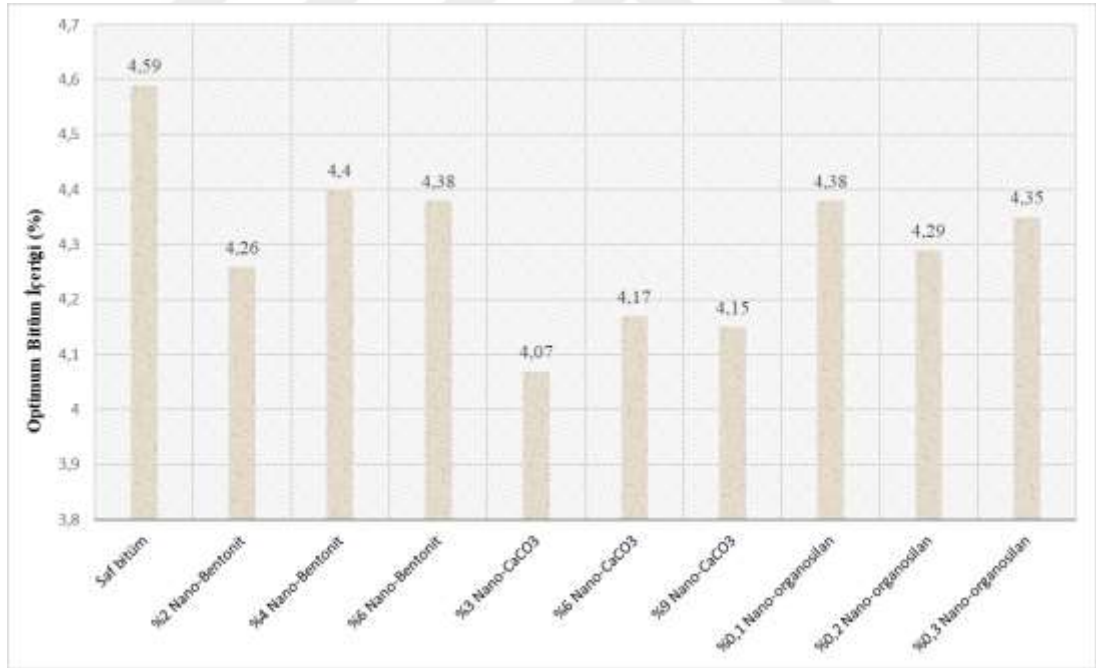
Tablo 5.6 % 4 hava boşluğuna karşılık gelen Marshall mekanik ve hacimsel özellikleri

Karışım Tipi	Katkı %	Opt. Bitüm (%)	Marshall Stabilitesi (kg)	Akma (mm)	VMA (%)	VFA (%)	Hacim Özgül Ağırlığı D_p (gr/cm ³)
Kontrol Karışım	0	4,59	1182	2,53	14,3	72,0	2,41
Nano-Bentonit'li Karışım	2	4,26	1309	2,41	14,2	71,9	2,41
	4	4,40	1250	2,44	14,7	73,2	2,39
	6	4,38	1332	2,35	14,0	71,5	2,41
Nano-CaCO₃'lı Karışım	3	4,07	1213	2,13	14,1	66,3	2,40
	6	4,17	1207	2,17	14,1	68,1	2,40
	9	4,15	1246	2,00	13,9	71,3	2,46
Nano-organosilan'lı Karışım	0,1	4,38	1193	2,38	14,0	71,6	2,41
	0,2	4,29	1180	2,12	14,1	71,6	2,41
	0,3	4,35	1210	2,13	14,1	71,6	2,41

Temel olarak filler olan nano-Bentonit ve nano-CaCO₃, optimum bağlayıcı içeriğinin azalmasına neden olmuştur. Bu azalma, bağlayıcıların karıştırma ve sıkıştırma sıcaklık aralıklarını belirlemek için kullanılan ASTM D 2493 standardı ile uyumlu olarak Asfalt Enstitüsü eş-viskozite (equiviscous) yaklaşımından kaynaklanabilmektedir. Bu yaklaşım, bazı modifiye edilmiş bağlayıcı tipleri, özellikle de filler içeren bitümler için önerilmemektedir. Çünkü, filler niteliğindeki katkılarla modifiye edilmiş bağlayıcılarda bu yaklaşım kullanılarak elde edilen karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları çoğu zaman daha yüksek çıkabilmektedir. Bu durum bağlayıcının viskozitesinin tamamen kesme hızına bağlı olduğu yalancı plastiklik (pseudoplasticity) olarak bilinen bir fenomenden kaynaklanmaktadır.

Tablo 5.2'de verilen sonuçlarda görüldüğü gibi, filler (nano-Bentonit ve nano-CaCO₃) içeren bağlayıcılarla hazırlanan asfalt karışımları kontrol karışımına kıyasla nispeten daha yüksek karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları sergilemektedir. Bu yüksek sıcaklıklar, bağlayıcı viskozitesinin azaltılmasına ve dolayısıyla % 4 hava boşluğuna karşılık gelen daha az bağlayıcı içeriğine ihtiyaç duyulmasına yol açar.

En düşük optimum bitüm içeriği, % 3 nano-CaCO₃ katkılı karışımlarda elde edilmiştir. Nano-CaCO₃'ün oranı % 6 ve % 9'a yükseltildikçe (bu iki oranda hemen hemen aynı optimum bitüm içeriği değerleri elde edilmiştir.) optimum bitüm içeriği de artmıştır. Aynı şey nano-Bentonit için de geçerlidir. Çünkü nano katkıları aynı zamanda bir dolgu maddesidir ve böylece filler içeriğini arttırmak suretiyle VMA ve VFA yüzdesinde azalma gözlemlenmiştir. Bu durum, nano malzeme yüzey alanının yüksek olması nedeni ile yeterli bitüm film kalınlığı ile taneleri kaplamak için daha fazla bitüm gerektirmesinden kaynaklanabilir.



Şekil 5.26 Farklı katkı oranları için % 4 hava boşluğuna karşılık gelen optimum bitüm içerikleri

Nano-organosilan da aynı şekilde optimum bitüm içeriğini azaltmıştır. Bu sonuç iki nedene bağlı olarak gelişebilir; bunlardan birincisi, nano-organosilan'ın sıvı fiziksel formda olması nedeni ile bitümün viskozitesini düşürerek karıştırma ve sıkıştırma

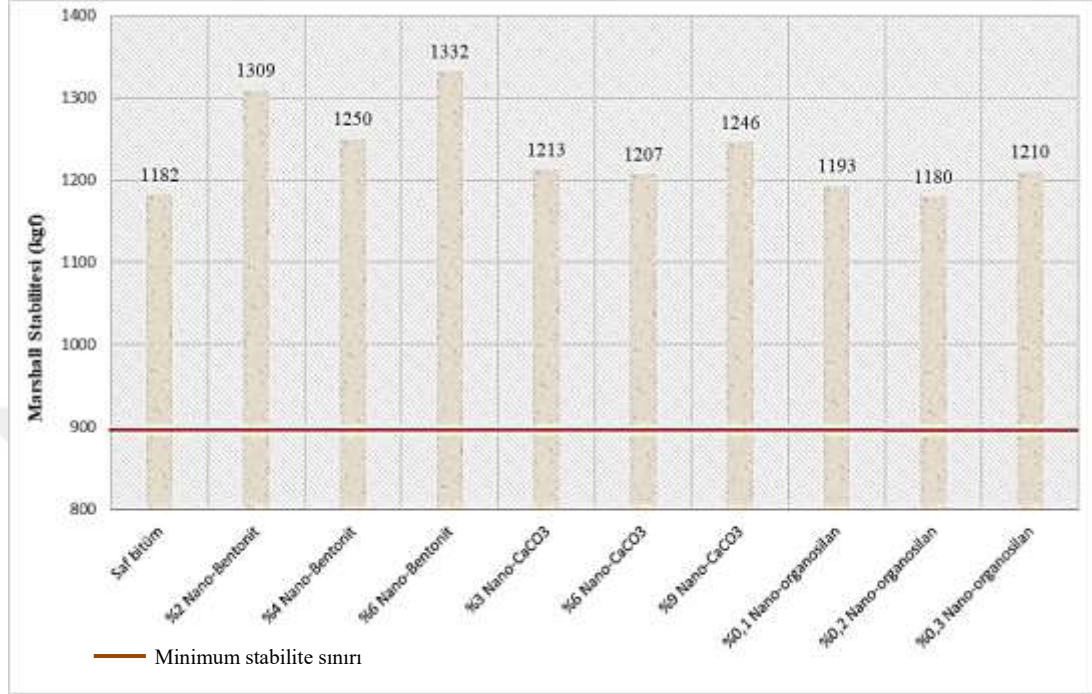
sıcaklıklarının azalmasına neden olması, nano-organosilan'ın agrega yüzeyini nispeten daha düşük sıcaklıklarda bile tamamen kaplayabilmesi nedeni ile optimum sonucun daha düşük bitüm içeriklerinde alınabilmesidir. Diğer ise, nano-organosilan'ın sıkıştırmaya yardımcı olarak, aynı miktarda sıkıştırma enerjisi uygulanarak sıkıştırılmış karışımdaki boşlukların daha fazla azalmasıdır. Böylece karışımda istenilen hava boşluk değerlerine ulaşabilmek için daha az bitüm gerektirmektedir. Nano-organosilan oranı diğer iki modifiye edici nano katkı maddelerine göre önemli ölçüde daha az (%0,1, %0,2 ve %0,3 bitüm ağırlığınca nano-organosilan) olmasına rağmen, yine de nispeten iyi sonuçlar vermektedir.

Tablo 5.6 ve Şekil 5.27'de görüldüğü gibi, tüm stabilite değerleri minimum değer (900 kgf) oldukça üzerindedir ve Karayolları Teknik Şartnamesine uygundur. Stabilite değerleri, özellikle %6 nano-Bentonit modifiye karışımlar için önemli ölçüde artmıştır. Bu oran, nano-Bentonit modifiye karışımlarda kontrol karışımına göre %11 daha fazladır. Bu iyileşme filler halindeki nano-Bentonit'ten kaynaklanabilir.

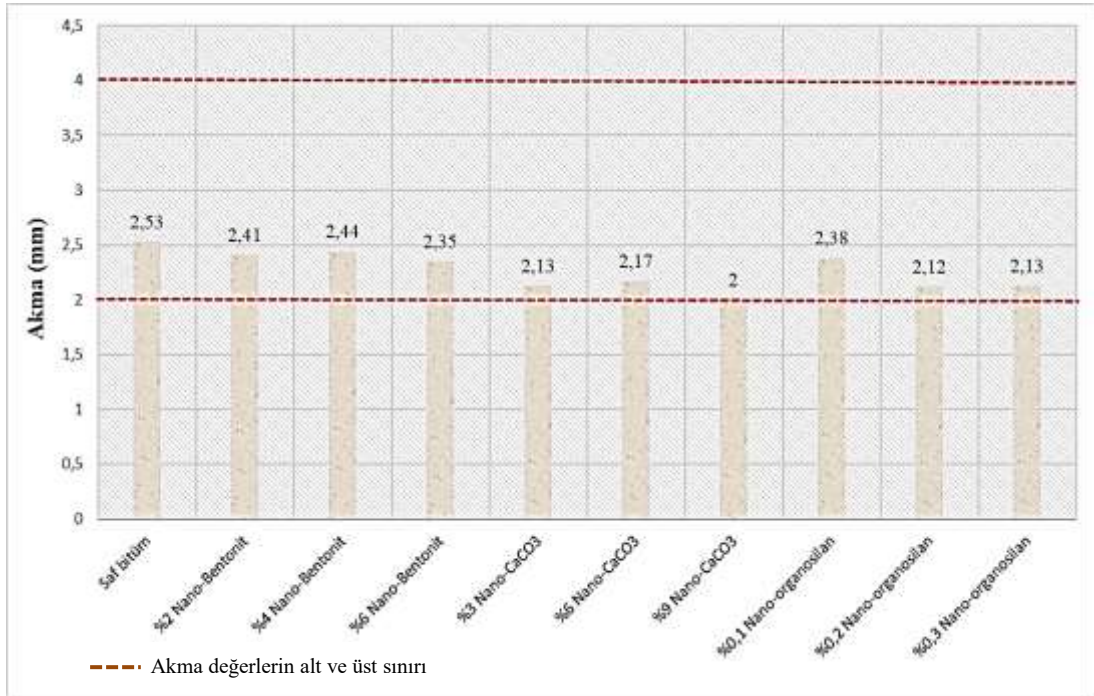
Nano-CaCO₃ modifikasyonu, kontrol karışımına kıyasla stabilitesini arttırmak açısından da etkili olmuştur. Nano-organosilan katkılı karışımın stabilitesindeki artış, nano-Bentonit ve nano-CaCO₃ ile hazırlanan karışımlar için elde edilen stabilite sonuçları ile karşılaştırıldığında daha düşük kalmaktadır.

Kontrol karışımına kıyasla nanomodifiye bitümlü bağlayıcılarla hazırlanan karışımların akma değerlerinde biraz azalma gözlemlenmiştir (Tablo 5.6 ve Şekil 5.28). Nano-Bentonit içeren karışımların akma değerleri, nano-CaCO₃ ve nano-organosilan modifiye bitüm bağlayıcılarla hazırlanan karışımlarda elde edilen akma değerlerinden nispeten daha yüksektir. Bunun anlamı, nano-Bentonit modifikasyonu ile potansiyel olarak daha fazla esnekliğe sahip bir kaplama inşa edilmesine neden olabilecek bir karışım elde edilebilmektedir. Aşınma tabakasında kullanılan karışımlar için akma değerleri 2-4 mm arasında olmalıdır. Soğuk bölgelerde kullanılacak kaplamalar için düşük akma değerlerine sahip karışımlar tavsiye edilmemektedir. Bunun nedeni, düşük akma değerlerine sahip karışımlar, daha düşük sıcaklıklarda oldukça kırılğan bir karışıma neden olarak, trafik yükü etkisi altında kolayca

çatlayabilir. 4 mm'nin üzerindeki akma değerlerine sahip karışımların plastik olduğu kabul edilir ve plastik deformasyona eğilimlidir.



Şekil 5.27 Optimum bağlayıcı içeriklerindeki Marshall stabilite değerleri



Şekil 5.28 Optimum bağlayıcı içeriğindeki akış değerleri (mm)

Hem kontrol hem de nanomodifiye karışımların VMA %'si, Karayolları Teknik Şartnamesinde aşınma tabakası için önerilen 12,5 mm'lik nominal maksimum agregata büyüklüğü (Nominal Maximum Aggregate Size; NMAS) için minimum % 14 sınırını karşılamıştır. Tek istisna, % 14 VMA sınırının hemen altında olan % 9 nano-CaCO₃ için görülmüştür. Bu durum, gereğinden daha yüksek oranda modifikasyon katkısı eklenmesinden kaynaklanır. Nano-CaCO₃'ün aynı zamanda bir dolgu maddesi olması, bu katkı içeriğinde modifikasyon için neredeyse uygun olmamaktadır.

5.2.2 Modifiye Lottman Deneyi Sonuçları (AASHTO T 283-07)

Bu deney yöntemi, nano malzemelerin asfalt karışımlarının neme bağlı hasarlara karşı dayanımlarını iyileştirip iyileştirmediğini belirlemek amacıyla sıkıştırılmış asfalt numuneleri üzerinde gerçekleştirilmiştir. Saf ve üç farklı nanomodifiye katkının farklı içeriklerinde hazırlanan bitümlü bağlayıcıların optimum içeriklerinde hazırlanan on farklı karışımın her biri için altışar adet asfalt briketi hazırlanmıştır.

Altı briket numunesinden üçü şartlandırma işlemine tabi tutulurken, diğer üçü şartlandırılmayarak kuru halde bırakılmıştır. Şartlandırma işleminin tamamlanmasından sonra, asfalt numuneleri ASTM D6931'ye uygun olarak indirekt çekme mukavemeti (ITS) deneyine tabi tutulmuşlardır. Deneysel çalışmanın detayları AASHTO T283 standardında tanımlanmıştır.

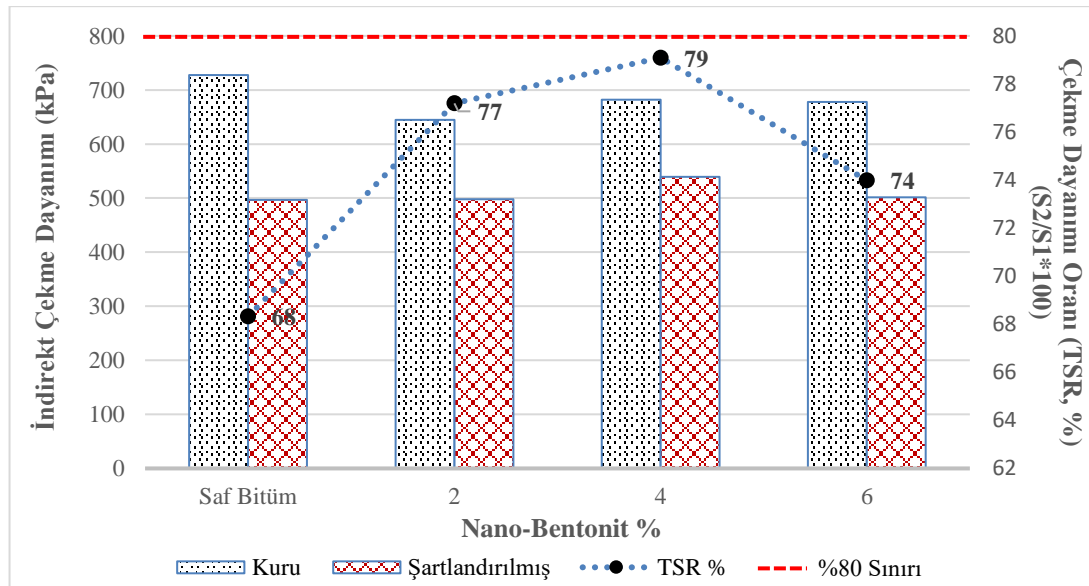
İndirekt çekme mukavemeti deneyi (ITS) ve çekme mukavemeti oranı (TSR %) ile ilgili hesaplamalar **Ek 2'**de tablo halinde sunulmuştur. Kontrol karışımları ve nano modifiye bitümlü bağlayıcıların optimum bitüm içeriklerinde hazırlanan karışımların ITS ve TSR değerleri Tablo 5.7'de sunulmaktadır.

Tablo 5.7 ve Şekil 5.29 - 5.31'de sunulan sonuçlara bakıldığında, şartlandırılmış numuneler için ITS değerlerinin kuru örneklerden daha düşük olduğu gözlenmiştir. Bu beklenen bir davranıştır. Çünkü şartlandırma sürecinde suyun varlığı, agregata ve bitüm arasındaki bağı zayıflattığından daha düşük ITS değerleri elde edilmektedir. Şartlandırma işleminden sonra nano-modifiye katkılı karışımların ITS değerleri kontrol karışımlarına göre daha az düşüş sergilemektedir.

Tablo 5.7 Optimum bitüm içeriğinde hazırlanan kuru ve şartlandırılmış asfalt numunelerinin ITS ve TSR değerleri

Karışım Tipi	Katkı (%)	Opt. Bitüm (%)	ITS değerlerin ortalaması (KPa)		TSR %
			Kuru	Şartlandırılmış	
Kontrol Karışım	0	4,59	727	497	68
Nano-Bentonit'li Karışım	2	4,26	645	498	77
	4	4,40	682	539	79
	6	4,38	678	502	74
Nano-CaCO ₃ 'lı Karışım	3	4,07	721	528	73
	6	4,17	740	562	76
	9	4,15	719	535	74
Nano-organosilan'lı Karışım	0,1	4,38	621	541	87
	0,2	4,29	632	551	87
	0,3	4,35	645	547	85

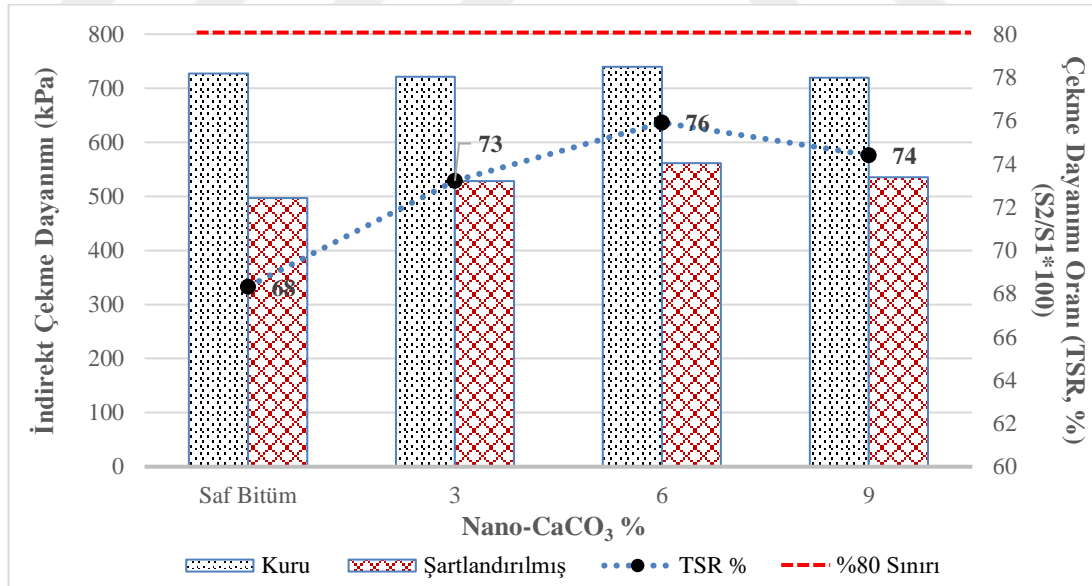
Nanomalzeme modifikasyonunun neme karşı duyarlılık üzerindeki etkisini anlayabilmek amacıyla, modifiye edilmiş ve saf bitümlü bağlayıcılarla hazırlanan karışımların, hem kuru hem de şartlandırılmış numunelerinde elde edilen ITS sonuçları Şekil 5.29–5.31'de gösterildiği gibidir. Elde edilen TSR% değerleri de grafik üzerinde doğrusal bir çizgi ile gösterilmiştir.



Şekil 5.29 Saf ve nano-Bentonit modifiye bitüm ile hazırlanan karışımların ITS ve TSR sonuçları

Şekil 5.29'a göre, nano-Bentonit modifiye bitüm ile hazırlanan karışımlar, kuru numuneler için kontrol karışımlarına kıyasla biraz daha düşük ITS değerlerine neden olmuştur. Şartlandırılmış numuneler için elde edilen sonuçlara bakıldığında ise % 4 nano-Bentonit ile modifiye edilmiş bitüm ile hazırlanan karışım, nispeten daha yüksek ITS değeri ile sonuçlanmıştır.

Nano-Bentonit için elde edilen çekme mukavemeti oranı (TSR%) değerleri de önemli ölçüde iyileşmiştir. % 4 nano-Bentonit modifiye bitüm içeren numuneler için en yüksek TSR değeri elde edilmiş olup % 80'lik minimum sınıra çok yakın bir değer almıştır. Kontrol karışımı ile karşılaştırıldığında, nano-Bentonit, sırasıyla %2, %4 ve %6 oranları için %12, %14 ve %8 oranında TSR değerlerini arttırmıştır. Bu sonuçlar, nano-Bentonit'in, bitümün adezyon ve kohezyon yeteneğini geliştirmede potansiyel olarak yardımcı olabileceğini göstermektedir. Bu sonuç, artan viskoziteye bağlanabilir ve bu nedenle modifikasyon bitümlü bağlayıcının sertleşmesine neden olmaktadır. Daha sert bir bağlayıcı genellikle bitümlü bağlayıcının agrega tane yüzeyinden soyulmasına direnir, dolayısıyla neme karşı direnç artmaktadır.



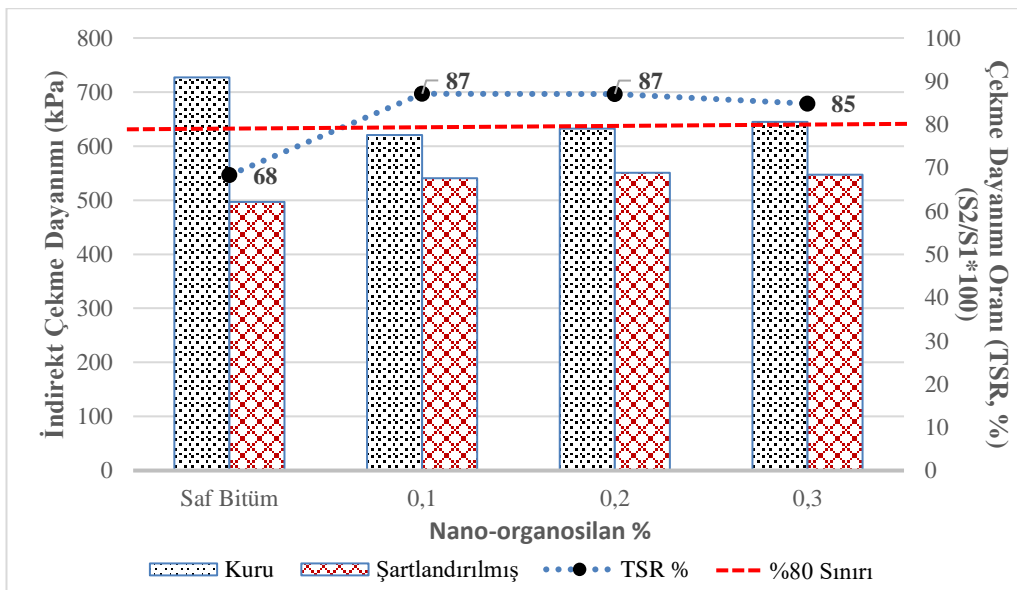
Şekil 5.30 Saf ve nano-CaCO₃ modifiye bitüm ile hazırlanan karışımların ITS ve TSR sonuçları

Şekil 5.30'a göre, nano-CaCO₃ modifiye bitüm ile hazırlanan karışımlar, hem kuru hem de şartlandırılmış numuneler için nispeten daha yüksek ITS değerlerine neden olmuştur. Kuru numuneler için elde edilen sonuçlar, ITS değerinin biraz iyileştiği

nano-CaCO₃ içeriğinin %6'sı hariç olmak üzere, kontrol karışımı ile aynı değere sahiptir. Öte yandan, şartlandırılmış numuneler için ITS değerleri önemli ölçüde geliştirilmiştir. Şartlandırılmış numuneler için en yüksek ITS, kontrol karışımına göre %12 oranında ITS değerlerini arttıran nano-CaCO₃'ün %6 oranında elde edilmiştir.

Nano-CaCO₃ için elde edilen TSR değerleri de kontrol karışımı ile karşılaştırıldığında önemli ölçüde artmıştır. TSR değerleri neredeyse minimum sınıra ulaşmış ve modifiye edici katkıının her üç oranı için %70 ila %80 arasında kalmıştır. En yüksek TSR değeri %6 nano-CaCO₃ modifikasyonu ile elde edilmiştir. Bu katkı oranında, kontrol numuneleri ile karşılaştırıldığında TSR değeri %11 oranında yükselmiştir.

TSR değerindeki iyileşme veya başka bir deyişle nano-CaCO₃ ile modifiye edildiğinde karışımın neme bağlı hasarlara karşı direncindeki artış, bağlayıcı ve agrega yüzeyi arasındaki bağlanma mukavemetinin artmasına neden olan bünye özelliklerine bağlanabilir. Modifiye edilmiş bağlayıcı, kaplanmış agreganın su içeriğinden dolayı kolayca yer değiştirmesine izin vermeyerek soyulma ihtimalini ortadan kaldırmaktadır. Nano-CaCO₃ temel olarak bir soyulma önleyici katkı maddesidir ve modifiye edici olarak kullanımı, neme bağlı sıkıntılara dirençli karışımların tasarımı için asfalt endüstrisinde çok önemlidir.



Şekil 5.31 Saf ve nano-organosilan modifiye bitüm ile hazırlanan karışımların ITS ve TSR sonuçları

Şekil 5.31'de, nano-organosilan katkısının kontrol karışımına kıyasla şartlandırılmış numunelerin ITS değerlerini geliştirdiği sonucuna varılmıştır. Bununla birlikte, kuru numuneler için ITS değerleri, kontrol karışımı değerlerinden daha düşüktür.

Nano-organosilan içeren karışımların TSR değerleri incelendiğinde, nano-organosilan ile bitüm modifikasyonunun önemli ölçüde daha düşük karıştırma oranına rağmen, TSR değerlerinin, %80'lik minimum kriterin oldukça üzerine çıktığı görülmektedir. Kontrol karışımına kıyasla, %0,1 nano-organosilan ilavesi ile TSR değeri % 22 oranında artmıştır ve nano-organosilan'ın bu oranı optimum dozaj olarak kabul edilmektedir. Bu olumlu etki nano-organosilan'ın temel olarak bir silan soyulma önleyici katkı maddesi olduğundan kaynaklanmaktadır. Aslında, nano-organosilan, agrega-bitüm ara yüzeyindeki soyulma potansiyelini azaltacak şekilde kimyasal bağlanmayı sağlamaktadır.

Kuru numuneleri içeren nano-Bentonit ve nano-organosilan için ITS değerleri, saf ve nano-CaCO₃ modifiye bitüm ile hazırlanan karışımlar için elde edilen sonuçlardan biraz daha düşüktür. Şartlandırılmış numunelerin ITS değerleri, nano-organosilan'ın her üç oranı için nispeten arttırılmış değerler göstermesiyle sonuçlanmıştır. Aynı zamanda nemden kaynaklı problemlere karşı dayanım kazandırma üzerindeki olumlu etkisinin bir işaretidir.

Şekil 5.29 ila 5.31'de görüldüğü gibi, Saf bitüm ile hazırlanan asfalt numuneleri şartname kriteri olan minimum %80 TSR değerini sağlayamamış ve saf bitüm ile üretilen asfalt karışımları neme duyarlı olarak kabul edilmiştir. Nano-Bentonit ve nano-CaCO₃ katkılı bitüm içeren asfalt numunelerinde TSR değerleri % 70 ile % 80 arasında kalmıştır. Bazı örneklerde % 80 TSR değerinin sağlanamamasının nedeni, AASHTO T283 standardında numuneleri koşullandırmak amacıyla uygulanan donma ve çözülme döngüsünün asfalt numunelerini sudan kaynaklı bozulmalara karşı direnç bakımından daha zayıf hale getirmesidir. Bu nedenle %80'den daha düşük TSR değerleri elde edilebilmektedir. Şartlandırma sırasında numuneler üzerinde donma ve çözme döngüsü uygulanmazsa (koşullandırma işleminde donma ve çözme döngüleri bazı standartlarda uygulanmamaktadır örn. EN 12697-12), nano malzemelerle

modifiye edilmiş bitümlerle üretilen asfalt karışımlarının % 80'den daha yüksek TSR değerleri elde edilmesi beklenebilir.

Nano-organosilan modifiye bitüm ile hazırlanan numunelerde ise TSR değerleri önemli ölçüde gelişmiş ve % 80'den daha yüksek değerler elde edilmiştir. Nano malzeme katkılı asfalt karışımlarının sudan kaynaklanan bozulmalara karşı kullanılarak direncinin nasıl arttırılacağı ve minimum % 80 TSR değerlerinin sağlanmasına yönelik çalışmaların yapılması gerekmektedir. Deney sonuçlarına göre nano-organosilan ve filler niteliğindeki nano malzemelerin birlikte kullanılması bu soruna çözüm olabilecektir. Gelecekte yapılacak çalışmalarda bu konu üzerinde durulması önerilmektedir.

BÖLÜM ALTI

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu bölüm, tez kapsamında yürütülen laboratuvar deneylerinin analizinden elde edilen genel sonuçlarını içermektedir. Gelecekteki araştırma çalışmaları için öneriler ise bu bölümün sonunda ayrıca sunulmaktadır.

6.1 Sonuçlar

Özellikle son birkaç on yılda, bitümlü bağlayıcı özelliklerini iyileştirmek ve dolayısıyla daha dirençli yol kaplamaları üretmek için nanomalzemelerin asfalt kaplama endüstrisinde kullanılması, araştırmacı ve mühendislerin ilgisini çekmiştir. Nanomalzemeler, mikro boyuttaki malzemelerle karşılaştırıldığında oldukça yüksek yüzey alanlarına sahip olduklarından, mikro boyuttaki malzemelere göre daha reaktif olduklarından modifikasyon açısından daha elverişlidir. Nanomalzemeler nispeten pahalı olmakla birlikte, genellikle daha düşük oranlarda bitüme eklenmektedir. Kaplamanın yapısal ömrünü uzatarak bakım masraflarının düşmesine neden olmaktadır.

Bu çalışma, nanomalzemelerin (nano-Bentonit, nano-CaCO₃ ve nano-organosilan) bitümün temel fiziksel ve reolojik özelliklerine olan kapsamlı etkisini araştırmak için yapılmıştır. Ayrıca, saf ve nano modifiye bitüm ile hazırlanan bitümlü karışımların mekanik ve hacimsel özellikleri Marshall karışımı tasarımı ile araştırılmıştır. Ayrıca, modifiye Lottman deneyi, sıkıştırılmış bitümlü karışımların nem hassasiyetlerini değerlendirmek için bir performans deneyi olarak gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçlarının analizinden elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir.

6.1.1 Geleneksel Deneylerden Elde Edilen Sonuçlar

- Floresan mikroskop (FM) ile alınan mikrograflar bitüm fazındaki nanoparçacıkların düzgün dağılımını gösterir. Ancak, % 9 nano-CaCO₃ modifiye bağlayıcı numuneleri için rasgele aglomerasyonlar tespit edilmiştir. Bu içerikte

nano-CaCO₃'ın daha az düzensiz difüzyonunu göstermektedir. Sıvı bir katkı maddesi olması nedeniyle nano-organosilan, bağlayıcı fazında tamamen çözünerek mikrograflarda herhangi bir iz bırakmamıştır.

- Nanomalzemeler topraklanarak bir arada bulduklarında, normal boyuttaki malzemeler gibi davranmaya başladıkları için nanomalzemelerden beklenen faydalar azalmaktadır.
- Her üç katkı maddesinin için de penetrasyon ve yumuşatma noktası değerleri sonuçlar üzerinde etkili değildir. Özellikle nano-Bentonit için kısa süreli yaşlanma uygulandıktan sonra yüksek kalıcı penetrasyon ve yumuşama noktası değerlerinde daha az artış gözlemlenmiştir. Bu durum ise nanomalzemelerin saf bitüme kıyasla yaşlanmaya karşı daha iyi performans sergilediklerini göstermektedir.
- Sıcaklık duyarlılığını temsil eden penetrasyon indeksi değerleri, katkı içeriğindeki artışla birlikte yükselmiştir. En yüksek PI değeri ise nano-CaCO₃ ile modifiye edilmiş bağlayıcı için gözlemlenmektedir. Bu durum, nano-CaCO₃'ün bitümlü bağlayıcının yüksek sıcaklığa sahip performansını önemli ölçüde arttırdığına işaret etmektedir. Her üç nanomalzemenin, modifiye bitümün yüksek sıcaklık depolanma kararlılığını önemli ölçüde artırabileceğini göstermektedir.

Beklendiği gibi viskozite değerleri, katkı içeriğinin artması ile daha da yükselmektedir. En yüksek viskozite değeri, bağlayıcının % 6 nano-Bentonit içeriği ile modifiye edildiğinde görülmektedir. Ancak, nano-organosilan ile modifiye edilmiş bağlayıcılar için viskozite değerleri düşmekte, bu da kontrol karışımlarına kıyasla daha düşük karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarına neden olmaktadır.

6.1.2 Reolojik Deneylerden Elde Edilen Sonuçlar

- Nanomalzemeler, yüksek kritik sıcaklık değeri için Performans Derecelenmesini (PG) yükseltmek açısından o kadar etkili olmamaktadır. PG sınıfının 64°C'den 70°C'ye yükseldiği % 6 nano-Bentonit ve % 9 nano-CaCO₃ içeriği için, modifiye bağlayıcının kalıcı deformasyona karşı daha iyi performans gösterdiğini

belirtmektedir. Öte yandan nano-organosilan, PG'nin yüksek kritik sıcaklık artışı açısından o kadar etkileyici olmamıştır.

- PG'nin yüksek kritik sıcaklığı, yaşlanmamış ve RTFOT yaşlı nanomodifiye bağlayıcı numuneleri için sabit kalmıştır. Bu durum, nanomodifiye bağlayıcı numunelerinin yaşlanmaya karşı daha az duyarlı hale geldiğine işaret etmektedir.
- İki frekans ve dört farklı sıcaklıktaki yaşlandırılmamış ve RTFOT yaşlı numunelerin reolojik karakterizasyonu için yapılan deneysel çalışma sonuçları, $G^*/\sin\delta$ (kalıcı deformasyon parametresi), 0,01 ve 10 Hz'de 50°C ile 80°C arasında değişen sıcaklıklarla ilişkilendirilerek görüntülenmiştir.
- Yüksek frekansta (yükün hızlı uygulanması) ve düşük sıcaklıklarda hem saf hem de nanomodifiye edilmiş bağlayıcı numuneleri daha yüksek $G^*/\sin\delta$ değerleri vermektedir.
- RTFOT yaşlı numunelerin $G^*/\sin\delta$ değerleri, yaşlandırılmamış numunelere kıyasla daha yüksek çıkmıştır. Bunun nedeni, yaşlanma etkisinin numunelerin sertleşmesine neden olmasıdır.
- Kalıcı deformasyona karşı direnç, özellikle nano-CaCO₃ ve nano-Bentonit içeriği arttıkça, katkı içeriğindeki artış ile geliştirilmiştir (yüksek $G^*/\sin\delta$).

6.1.3 Marshall Deneyinden Elde Edilen Sonuçlar

- Optimum bağlayıcı içeriği % 4 hava boşluğu içeriğine karşılık gelen stabilite değeri olarak belirlenmiştir.
- Nanomalzeme modifiye bağlayıcı numuneleri ile hazırlanan tüm karışımların optimum bitüm içeriği kontrol karışımın kıyasıyla daha yüksektir. Nano modifiye bağlayıcıları içeren karışımlar için optimum bitüm içeriğinde azalmaya neden olan faktörler şunlardır:
 - Çok daha zayıf ve Moh's sıkalasındaki sertliği 2,5-3,0 arasında olan kireçtaşının agrega olarak kullanılması ve Marshall kompaktör ile sıkıştırması sırasında kolaylıkla ezilebileceği göz önüne alındığında, boşluk içeriğini azaltarak agreganın gradasyonunu etkilemektedir. Sonuç olarak, boşlukların doyurulması için daha az bağlayıcı içeriği gerekmektedir.

- Hem nano-Bentonit hem de nano-CaCO₃ temel olarak filler maddeleri olduklarından, karışımların boşluk içeriği azalmaktadır.
- Hem nano-Bentonit hem de nano-CaCO₃ nispeten yüksek sıkıştırma sıcaklıklarında daha fazla sıkıştırılır ve dolayısıyla boşluk içeriğinde daha fazla azalma sağlanmakta ve daha az gerekli olan bağlayıcı ile sonuçlanmaktadır.
- Nano-organosilan modifiye bitümün viskozitesi, % 0,1 oranında, özellikle agrega partiküllerini ve dolgu maddelerini kaplamak için daha az bağlayıcıya ihtiyaç duyabilecek şekilde azaltılmaktadır. Buna ek olarak, nano-organosilan, kolay sıkıştırmaya yardımcı olur. Bu nedenle, sıkıştırma için aynı miktarda bir çaba, sıkıştırılmış karışımdaki boşlukların azalmasına ve böylece karışımdaki istenen hava boşluklarına ulaşmak için daha az bitüm gerektirmesine neden olabilmektedir.
- Marshall stabilite değerleri yapılan modifikasyon ile geliştirilmiştir. Tüm değerler 900 kgf minimum stabilite sınırının çok üzerindedir ve nano-Bentonit için özellikle % 6 içerikte en yüksek değerini almıştır.
- % 9'luk nano-CaCO₃ için VMA'nın % 14'lük minimum kriterinin hemen altında, onun haricinde diğer her tür karışım için VMA ve VFA değerleri sınırda yer almıştır.
- Kontrol karışımına kıyasla nanomodifiye bitüm bağlayıcılarla hazırlanan karışımlarda akma değerlerinde azalma gözlenmektedir. Bununla birlikte, akma değerleri Karayolları Teknik Şartnamesi kriterlerine uygundur.

6.1.4 Performans Deneylerin Sonuçları (AASHTO T 283)

- Koşullandırılmış numuneler için ITS değerleri, bitümlü bağlayıcı ve agrega bağının zayıflamasına neden olan koşullandırma sırasında suyun mevcudiyetinden dolayı kuru numunelerde daha düşüktür. Bu nedenle, deneysel çalışmalar daha düşük çekme mukavemeti değerleri ile sonuçlanmaktadır. Bununla birlikte, nanomalzeme modifikasyonu ile karışımlar genellikle şartlandırılmış numunelerin ITS değerlerinden daha az bir düşük azalma sergilemektedir.

- Genel olarak, nano modifiye edilmiş numuneler, kontrol numunelerine kıyasla suya karşı duyarlılığı açısından daha iyi sonuçlar vermektedir..
- Nano-organosilan, TSR% değerlerini (TSR% değeri arttıkça, neme karşı daha dirençli karışım elde edilmektedir) çok etkileyici sonuçlar verir ve % 80 minimum kriterinin üstünde olmaktadır. TSR, optimum katkı oranı olarak kabul edilen % 0,1 nano-organosilan ile % 22'ye kadar artmaktadır.
- Nano-Bentonit ve nano-CaCO₃ için uygulanan koşullandırılmış numunelerdeki donma ve çözülme döngüsünden, onları sudan kaynaklı bozulmalara karşı direnç bakımından daha zayıf hale getirir ve bu nedenle %80'den daha düşük bir TSR değeri vermektedir. TSR% değerleri %70 ile %80 arasında kalmaktadır. Daha yüksek TSR değerleri % 4 nano-Bentonit ve % 6 nano-CaCO₃ içeriğinde elde edilmektedir.

6.2 Genel Sonuçlar

- Nanomalzemelerin asfalt modifikasyonunda kullanıldığında beklenen şekilde işlev görmesini sağlamak için bitümlü fazda düzgün ve homojen dağıtılmalıdır.
- Nanomalzemeler, daha yüksek sıcaklıklarda modifiye edilmiş bitümlü bağlayıcıların depolama kararlılığını arttırmak açısından çok etkilidir.
- Nanomalzemelerin eklenmesiyle bağlayıcının yüksek sıcaklık duyarlılığı azalır.
- Nanomalzemeler, özellikle nano-Bentonit bitümlü bağlayıcılarında yaşlanmayı geciktiren katkı maddesi olarak kullanılabilir.
- Nanomalzemeler, bitümlü bağlayıcının reolojik özelliklerini geliştirebilmektedir.
- Nanomodifiye asfalt karışımlarının neme karşı direnci özellikle nano-organosilan ile iyileşmektedir.
- Sonuçlara göre önerilen optimum katkı içerikleri aşağıdaki gibidir:
 - % 4,40 optimum bitüm içeriği ağırlığında % 4 nano-Bentonit.
 - % 4,17 optimum bitüm içeriği ağırlığında % 6 nano-CaCO₃.
 - % 4,38 optimum bitüm içeriği ağırlığında % 0,1 nano-organosilan.

6.3 Gelecekteki Araştırmalar için Öneriler

Bu alışma kapsamında nanomalzemelerin bitüm bağlayıcı ve asfalt karışımı üzerindeki genel etkilerini değerlendirmek için bir girişimde bulunulmuştur.

Gelecekteki potansiyel araştırma alanları ve ele alınabilecek sorunlar şunlardır:

- Nanoyapısal mimariyi daha iyi anlamak ve bitümlü bağlayıcının makroskopik performansına etkisini ilişkilendirmek için kullanılan nanomalzemeler ve nanomodifiye bağlayıcılar üzerinde gelişmiş nanoskopik karakterizasyon deneyleri gereklidir.
- Nanomodifiye bitümlü bağlayıcının uzun vadeli yaşlanma özellikleri ve düşük sıcaklık performanslarının değerlendirilmesi ideal bir konu gibi görölmektedir.
- Nanomalzemelerin polimer modifiye bağlayıcıların özellikleri üzerindeki kapsamlı araştırması da önerilmektedir.
- Benzer alışma granit ve bazalt agregası içeren nanomodifiye asfalt karışımları üzerinde de yapılmalıdır.
- Asfalt karışımları üzerindeki nanomalzemelerin etkisini tam olarak anlamak için daha fazla performans deneyi (kalıcı deformasyonun değerlendirilmesi amacıyla Hamburg tekerlek izi deneyi ve Superpave sisteminde bulunan diğer deneyleri) yapılmalıdır.
- Her üç katkı maddesi ile hazırlanan kaplamaların inşaat ve yaşam döngüsü maliyet analizinin yapılması ve doğrulukla karşılaştırılması gerekmektedir.

KAYNAKLAR

- Abdullah, M. E., Zamhari, K. A., Buhari, R., Kamaruddin, N. H. M., Nayan, N., Hainin, M. R., Hassan, N.A., Jaya, R.P. ve Yusoff, N. I. M. (2015). A review on the exploration of nanomaterials application in pavement engineering. *Jurnal Teknologi*, 73(4), 69-76.
- Adamis, Z. ve Williams, R. B. (2005). Bentonite, kaolin and selected clay minerals.
- Airey, G. D. ve Choi, Y. K. (2002). State of the art report on moisture sensitivity test methods for bituminous pavement materials. *Road Materials and Pavement Design*, 3(4), 355-372.
- Airey, G. D., Collop, A. C., Zoorob, S. E. ve Elliott, R. C. (2008). The influence of aggregate, filler and bitumen on asphalt mixture moisture damage. *Construction and Building Materials*, 22(9), 2015-2024.
- Ajayan, P. M. (1999). Nanotubes from carbon. *Chemical reviews*, 99(7), 1787-1800.
- Alagarasi, A. (2011). Chapter-*Introduction to Nanomaterials*.
- American Elements. (bt). *Calcium Carbonate Nanoparticles*. 25 Eylül 2017, <https://www.americanelements.com/calcium-carbonate-nanoparticles-471-34-1>
- Amin, I., El-Badawy, S. M., Breakah, T. ve Ibrahim, M. H. (2016). Effect of Functionalization and Mixing Process on the Rheological Properties of Asphalt Modified with Carbon Nanotubes. *American Journal of Civil Engineering and Architecture*, 4(3), 90-97.
- Amiri, P. (2011). Nano materials in asphalt and tar. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 5(12), 3270-3273.

- Amirkhanian, A. N., Xiao, F. P. ve Amirkhanian, S. N. (2011). Characterization of unaged asphalt binder modified with carbon nano particles. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 4(5), 281-286.
- Amirkhanian, A. N., Xiao, F., ve Amirkhanian, S. N. (2010). Evaluation of high temperature rheological characteristics of asphalt binder with carbon nano particles. *Journal of Testing and Evaluation*, 39(4), 583-591.
- Aragão, F. T. S., Lee, J., Kim, Y. R. ve Karki, P. (2010). Material-specific effects of hydrated lime on the properties and performance behavior of asphalt mixtures and asphaltic pavements. *Construction and building materials*, 24(4), 538-544.
- Azahara, W. N. A. W., Bujanga, M., Jayaa, R. P., Hainina, M. R., Aziza, M. M. A. ve Ngadib, N. (2015). Application of nanotechnology in asphalt binder: A conspectus and overview. *Jurnal Teknologi*, 76.
- Bagampadde, U., Isacsson, U. ve Kiggundu, B. M. (2004). Classical and contemporary aspects of stripping in bituminous mixes. *Road materials and pavement design*, 5(1), 7-43.
- Bai, J. B. ve Allaoui, A. (2003). Effect of the length and the aggregate size of MWNTs on the improvement efficiency of the mechanical and electrical properties of nanocomposites—experimental investigation. *Composites Part A: applied science and manufacturing*, 34(8), 689-694.
- Bates, R. L. ve Jackson, J. (1987). *Glossary of Geology*. Alexandria, Virginia: American Geological Institute, 788.
- Beeldens, A. (2006). An environmental friendly solution for air purification and self-cleaning effect: the application of TiO₂ as photocatalyst in concrete. *Proceedings of Transport Research Arena Europe-TRA*, Göteborg, Sweden.

- Bhatia, S. (2016). Nanoparticles Types, Classification, Characterization, Fabrication Methods and Drug Delivery Applications. *In Natural Polymer Drug Delivery Systems* (pp. 33-93). Springer International Publishing.
- Bhattacharya, A. (2014). *TEG 474X – Nanotechnology and Corrosion*. 21 Kasım 2017, http://events.nace.org/TCCNews/2ndquarter_2014/teg474x.asp
- Bilal, S., Mohammed-Dabo, I. A., Dewu, B. B. M., Momoh, O. R., Funtua, I. I., Oladipo, M. O. A., Arabi, A.S. ve Muhammad, T. (2016). Comparative analysis of the effect of cation exchange capacity (CEC) on raw and treated Nigerian Bentonitic clay samples. *Journal of Scientific and Engineering Research*, 3(2), 177-182.
- Boverhof, D. R., Bramante, C. M., Butala, J. H., Clancy, S. F., Lafranconi, M., West, J., ve Gordon, S. C. (2015). Comparative assessment of nanomaterial definitions and safety evaluation considerations. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 73(1), 137-150.
- Bretz, JH. (1942). Vadose and Phreatic Features of Limestone Caves. *Journal of Geology*, 50, 79-811.
- Canestrari, F., Cardone, F., Graziani, A., Santagata, F. A. ve Bahia, H. U. (2010). Adhesive and cohesive properties of asphalt-aggregate systems subjected to moisture damage. *Road Materials and Pavement Design*, 11(sup1), 11-32.
- Cao, G. (2004). Imperial College Press. *Nanostructures & nanomaterials: synthesis, properties & applications*.
- Cheng, J., Shen, J. ve Xiao, F. (2011). Moisture susceptibility of warm-mix asphalt mixtures containing nanosized hydrated lime. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23(11), 1552-1559.

- CIEL Publication. (2014). *Nanomaterials Definition Fact Sheet*. 5 Şubat 2018, http://www.ciel.org/wp-content/uploads/2015/07/Nano_definition_Nov2014.pdf
- Corbett, L. W. ve Merz, R. E. (1975). Asphalt binder hardening in the Michigan test road after 18 years of service. *Transportation Research Record*, (544).
- Curtis, C. W., Ensley, K. ve Epps, J. (1993). *Fundamental properties of asphalt-aggregate interactions including adhesion and absorption (No. SHRP-A-341)*. Washington, DC, USA: National Research Council.
- Dalas, E., Klepetsanis, P. ve Koutsoukos, P. G. (1999). The overgrowth of calcium carbonate on poly (vinyl chloride-co-vinyl acetate-co-maleic acid). *Langmuir*, 15(23), 8322-8327.
- Drexler, K. E. (1981). Molecular engineering: An approach to the development of general capabilities for molecular manipulation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 78(9), 5275-5278.
- Dylla, H., Asadi, S. ve Hassan, M. (2012, January). Exposure to Nanoparticles during Asphalt Paving of Photocatalytic Asphalt Pavements. In *IIE Annual Conference. Proceedings* (p. 1). Institute of Industrial and Systems Engineers (IISE).
- Enieb, M. ve Diab, A. (2017). Characteristics of asphalt binder and mixture containing nanosilica. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 10(2), 148-157.
- Epps, J. A. ve Little, D. N. (2001). *The benefits of Hydrated Lime in Hot Mix Asphalt*. National Lime Association.
- Fang, C., Yu, R., Liu, S. ve Li, Y. (2013). Nanomaterials applied in asphalt modification: a review. *Journal of Materials Science & Technology*, 29(7), 589-594.

- Faramarzi, M., Arabani, M., Haghi, A. K. ve Mottaghtalab, V. (2015). Carbon nanotubes-modified asphalt binder: preparation and characterization. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 8(1), 29-37.
- Feynman, R. P. (1960). There's plenty of room at the bottom. *Engineering and science*, 23(5), 22-36.
- Fu, H., Xie, L., Dou, D., Li, L., Yu, M. ve Yao, S. (2007). Storage stability and compatibility of asphalt binder modified by SBS graft copolymer. *Construction and Building Materials*, 21(7), 1528-1533.
- Fujishima, A. ve Zhang, X. (2006). Titanium dioxide photocatalysis: present situation and future approaches. *Comptes Rendus Chimie*, 9(5), 750-760.
- Galooyak, S. S., Dabir, B., Nazarbeygi, A. E. ve Moeini, A. (2010). Rheological properties and storage stability of bitumen/SBS/montmorillonite composites. *Construction and Building Materials*, 24(3), 300-307.
- Ghile, D. B. (2006). *Effects of nanoclay modification on rheology of bitumen and on performance of asphalt mixtures*. Yüksek lisans tezi, Delft, The Netherlands: Delft University of Technology.
- Goh, S. W., Akin, M., You, Z. ve Shi, X. (2011). Effect of deicing solutions on the tensile strength of micro-or nano-modified asphalt mixture. *Construction and Building Materials*, 25(1), 195-200.
- Gorkem, C. ve Sengoz, B. (2009). Predicting stripping and moisture induced damage of asphalt concrete prepared with polymer modified bitumen and hydrated lime. *Construction and Building Materials*, 23(6), 2227-2236.
- Habiba, K., Bracho-Rincon, D. P., Gonzalez-Feliciano, J. A., Villalobos-Santos, J. C., Makarov, V. I., Ortiz, D., Avalos, J.A., Gonzalez, C.I., Weiner, B.R. ve Morell, G.

- (2015). Synergistic antibacterial activity of PEGylated silver–graphene quantum dots nanocomposites. *Applied Materials Today*, 1(2), 80-87.
- Hamedi, G. H., Moghadas Nejad, F. ve Oveisi, K. (2015). Investigating the effects of using nanomaterials on moisture damage of HMA. *Road Materials and Pavement Design*, 16(3), 536-552.
- Han, N. F., Zhou, D. J. ve Tang, X. D. (2011). Effect of nano calcium carbonate and montmorillonite on properties of styrene–butadiene–styrene copolymer modified asphalt. *Applied Mechanics and Materials*, 99, 1035-1038. Trans Tech Publications.
- Hanyu, A., Ueno, S., Kasahara, A. ve Saito, K. (2005). Effect of the morphology of SBS modified asphalt on mechanical properties of binder and mixture. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 6, 1153-1167.
- Hao, X. H., Wang, Y. M. ve Zhang, A. Q. (2014). A Study on Improving the Adhesiveness between Granite and Asphalt by Nano-Scaled Calcium Carbonate. *Key Engineering Materials*, 575, 54-57. Trans Tech Publications.
- Hao, X. H., Zhang, A. Q. ve Yang, W. (2012). Study on the performance of nano calcium carbonate modified asphalt concrete AC-13. *Advanced Materials Research*, 450, 503-507. Trans Tech Publications.
- He, X. ve Shi, X. (2008). Chloride permeability and microstructure of Portland cement mortars incorporating nanomaterials. Transportation Research Record: *Journal of the Transportation Research Board*, (2070), 13-21.
- Henan Kingway Chemicals Co., Ltd. (2014). *Nano calcium carbonate (NM-1060)*. 28 Kasım 2017, [http://1001836.en.makepolo.com/products/Nano-Calcium-Carbonate%28NM 1060%29p19754185.html](http://1001836.en.makepolo.com/products/Nano-Calcium-Carbonate%28NM%201060%29p19754185.html)

- Hicks, R. G. (1991). *Moisture damage in asphalt concrete (No. 175)*. Transportation Research Board.
- Hoerr, R. A., Gupta, A. ve Matuszewski, M. J. (2009). Developing practices for safe handling of nanoparticles and nanomaterials in a development-stage enterprise: a practical guide for research and development organizations. *Safety of Nanoparticles* (pp. 1-18). Springer New York.
- Hunter, E. R. ve Ksaibati, K. (2002). Evaluating moisture susceptibility of asphalt mixes. Mountain-Plains Consortium.
- Ibrahim, I. ve Mehan, H. N. A. (2015). The effect of nano-materials on hot mixture “asphalt-concrete”. *Open Journal of Civil Engineering*, 5(04), 419.
- Iijima, S. ve Ichihashi, T. (1993). Single-shell carbon nanotubes of 1-nm diameter. *nature*, 363(6430), 603-605.
- Jahromi, S. G. ve Khodaii, A. (2009). Effects of nanoclay on rheological properties of bitumen binder. *Construction and Building Materials*, 23(8), 2894-2904.
- Jahromi, S. G., Andalibizade, B. ve Vossough, S. (2010). Engineering properties of nanoclay modified asphalt concrete mixtures. *Arabian Journal for Science & Engineering (Springer Science & Business Media BV)*, 35.
- Khattak, M. J., Khattab, A., Rizvi, H. R. ve Zhang, P. (2012). The impact of carbon nano-fiber modification on asphalt binder rheology. *Construction and Building Materials*, 30, 257-264.
- Khattak, M. J., Khattab, A., Zhang, P., Rizvi, H. R. ve Pesacreta, T. (2013). Microstructure and fracture morphology of carbon nano-fiber modified asphalt and hot mix asphalt mixtures. *Materials and structures*, 46(12), 2045-2057.

- Kostoff, R. N., Koytcheff, R. G. ve Lau, C. G. (2007). Global nanotechnology research literature overview. *Technological Forecasting and Social Change*, 74(9), 1733-1747.
- Lazzara, G. I. U. S. E. P. P. E. ve Milioto, S. T. E. F. A. N. A. (2010). Dispersions of nanosilica in biocompatible copolymers. *Polymer degradation and stability*, 95(4), 610-617.
- LeBaron, P. C., Wang, Z. ve Pinnavaia, T. J. (1999). Polymer-layered silicate nanocomposites: an overview. *Applied clay science*, 15(1), 11-29.
- Lee, J., Mahendra, S. ve Alvarez, P. J. J. (2009). Potential environmental and human health impacts of nanomaterials used in the construction industry. *Nanotechnology in Construction 3* (pp. 1-14). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Lee, S., Seo, Y. ve Kim, Y. R. (2010). Effect of hydrated lime on dynamic modulus of asphalt-aggregate mixtures in the state of North Carolina. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 14(6), 829-837.
- Li, P. ve Li, Y. L. (2014). Review on Nanomodified Asphalt. *Applied Mechanics and Materials*, 587, 1220-1223. Trans Tech Publications.
- Li, R., Xiao, F., Amirhanian, S., You, Z. ve Huang, J. (2017). Developments of nano materials and technologies on asphalt materials—A review. *Construction and Building Materials*, 143, 633-648.
- Liu, D. L., Yue, A. J. ve Chen, L. (2004). A Study of the Performance of Nano Calcium Carbonate Modified Asphalt and the Mixture [J]. *Journal of Changsha Communications University*, 4, 016.

- Liu, G., van de Ven, M., Wu, S., Yu, J. ve Molenaar, A. (2011). Influence of organo-montmorillonites on fatigue properties of bitumen and mortar. *International Journal of Fatigue*, 33(12), 1574-1582.
- Liu, G., Wu, S., Van de Ven, M., Yu, J. ve Molenaar, A. (2010). Influence of sodium and organo-montmorillonites on the properties of bitumen. *Applied Clay Science*, 49(1), 69-73.
- Luo, S., Liu, T., Benjamin, S. M. ve Brooks, J. S. (2013). Variable range hopping in single-wall carbon nanotube thin films: a processing–structure–property relationship study. *Langmuir*, 29(27), 8694-8702.
- Ma, X., Zhou, B., Sheng, Y., Wang, C., Pan, Y., Ma, S., ... ve Wang, Z. (2007). Preparation of calcium carbonate/poly (methyl methacrylate) composite microspheres by soapless emulsion polymerization. *Journal of applied polymer science*, 105(5), 2925-2929.
- Majeska, J. B. (2016). *Introduction to the Science of Asphalt Binders*. 16 Kasım 2017, <https://adventusmaterialdotcom.wordpress.com/2016/07/19/introduction-to-the-science-of-asphalt-binders/>
- Meghana, A. N., ve Kavitha, G. (2017). Laboratory Studies on Warm Mix Asphalt (WMA) using nano-organosilan Additive with Partial Replacement of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP). *i-Manager's Journal on Material Science*, 4(4), 18.
- Mirzababaei, P. (2016). Effect of Nano-organosilan on moisture susceptibility of Warm Mix Asphalt mixtures prepared with different aggregate types and gradations. *Construction and Building Materials*, 116, 403-412.
- Monthioux, M. (2011). *Carbon meta-nanotubes: Synthesis, properties and applications*. John Wiley & Sons.

- Nanotechnology 101. (b.t.). *What is So Special about the Nanoscale?*. 20 Kasım 2017, <https://www.sciencelearn.org.nz/resources/1676-novel-properties-emerge-at-the-nanoscale>
- Nejad, F. M., Azarhoosh, A. R., Hamed, G. H. ve Azarhoosh, M. J. (2012). Influence of using nonmaterial to reduce the moisture susceptibility of hot mix asphalt. *Construction and Building Materials*, 31, 384-388.
- Özen, H. (2011). Rutting evaluation of hydrated lime and SBS modified asphalt mixtures for laboratory and field compacted samples. *Construction and Building Materials*, 25(2), 756-765.
- Parker, S. P. (1988). *McGraw-Hill encyclopedia of the geological sciences*. McGraw-Hill.
- Parkes WR. (1982) *Occupational lung disorders*. London, Butterworths, pp 310–318.
- Partl, M. N., Gubler, R. ve Hugener, M. (2004). Nano-science and-technology for Asphalt Pavements. *Special Publication-Royal Society of Chemistry*, 292, 343-356.
- Pavement Interactive. (2012a). *Penetration Test*. 11 Eylül 2017, <http://www.pavementinteractive.org/penetration-test/>
- Pavement Interactive. (2012b). *Softening Point Test*. 11 Eylül 2017, <http://www.pavementinteractive.org/softening-point/>
- Pavement Interactive. (2012c). *Rotational Viscometer*. 15 Eylül 2017, <http://www.pavementinteractive.org/rotational-viscometer/>
- Pavement Interactive. (2012d). *Rolling Thin-Film Oven*. 15 Eylül 2017, <http://www.pavementinteractive.org/rolling-thin-film-oven/>

- Pavement Interactive. (2012e). *Dynamic shear rheometer*. 31 Eylül 2017, <http://www.pavementinteractive.org/dynamic-shear-rheometer/>
- Pavement Interactive. (2012f). *Marshall Mix Design*. 31 Eylül 2017, <http://www.pavementinteractive.org/marshall-mix-design/>
- Pavement Interactive. (2012g). *Moisture Susceptibility*. 31 Eylül 2017, <http://www.pavementinteractive.org/moisture-susceptibility/>
- Peponi, L., Puglia, D., Torre, L., Valentini, L. ve Kenny, J. M. (2014). Processing of nanostructured polymers and advanced polymeric based nanocomposites. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 85, 1-46.
- Plancher, H., Green, E. L. ve Petersen, J. C. (1976). Reduction of Oxidative Hardening of Asphalts by Treatment with Hydrated Lime--A Mechanistic Study. *Association of Asphalt Paving Technologists Proc*, 45.
- Polacco, G., Kříž, P., Filippi, S., Stastna, J., Biondi, D. ve Zanzotto, L. (2008). Rheological properties of asphalt/SBS/clay blends. *European Polymer Journal*, 44(11), 3512-3521.
- Politi, Y., Levi-Kalisman, Y., Raz, S., Wilt, F., Addadi, L., Weiner, S. ve Sagi, I. (2006). Structural characterization of the transient amorphous calcium carbonate precursor phase in sea urchin embryos. *Advanced Functional Materials*, 16(10), 1289-1298.
- Qi, L., Li, J. ve Ma, J. (2002). Biomimetic morphogenesis of calcium carbonate in mixed solutions of surfactants and double-hydrophilic block copolymers. *Advanced materials*, 14(4), 300.

- Qi, R. J. ve Zhu, Y. J. (2006). Microwave-Assisted Synthesis of Calcium Carbonate (Vaterite) of Various Morphologies in Water– Ethylene Glycol Mixed Solvents. *The Journal of Physical Chemistry B*, 110(16), 8302-8306.
- Ray, S. S. ve Okamoto, M. (2003). Polymer/layered silicate nanocomposites: a review from preparation to processing. *Progress in polymer science*, 28(11), 1539-1641.
- Reubush, S. D. (1999). *Effects of storage on the linear viscoelastic response of polymer-modified asphalt at intermediate to high temperatures*. Doktora tezi, Virginia Tech.
- Roberts, F. L., Kandhal, P. S., Brown, E. R., Lee, D. Y. ve Kennedy, T. W. (1991). Hot mix asphalt materials, mixture design and construction.
- Roberts, F.L., Kandhal, P.S., Brown, E.R., Lee, D.Y. ve Kennedy, T.W. (1996). *Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design, and Construction*. National Asphalt Pavement Association Education Foundation. Lanham, MD.
- Robichaud, C. O., Uyar, A. E., Darby, M. R., Zucker, L. G. ve Wiesner, M. R. (2009). Estimates of upper bounds and trends in nano-TiO₂ production as a basis for exposure assessment.
- Roco, M. C., Williams, R. S. ve Alivisatos, P. (Ed.). (2000). *Nanotechnology research directions: IWGN workshop report: vision for nanotechnology in the next decade*. Springer Science & Business Media.
- Rohith, N., ve Ranjitha, J. (2013). A study on marshall stability properties of warm mix asphalt using Zycotherm a chemical additive. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*. ISSN, 2278-0181.

- Sahoo, S. K., Parveen, S. ve Panda, J. J. (2007). The present and future of nanotechnology in human health care. *Nanomedicine: Nanotechnology, Biology and Medicine*, 3(1), 20-31.
- Santagata, E., Baglieri, O., Tsantilis, L. ve Dalmazzo, D. (2012). Rheological characterization of bituminous binders modified with carbon nanotubes. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 53, 546-555.
- Santiago, F., Mucientes, A. E., Osorio, M. ve Rivera, C. (2007). Preparation of composites and nanocomposites based on Bentonite and poly (sodium acrylate). Effect of amount of Bentonite on the swelling behaviour. *European Polymer Journal*, 43(1), 1-9.
- Schodek, D. L., Ferreira, P. ve Ashby, M. F. (2009). *Nanomaterials, nanotechnologies and design: an introduction for engineers and architects*. Butterworth-Heinemann.
- Sebaaly, P., Little, D., Hajj, E. ve Bhasin, A. (2007). Impact of lime and liquid antistripping agents on properties of Idaho hot-mix asphalt mixture. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (1998), 65-74.
- Sengoz, B. ve Isikyakar, G. (2008). Analysis of styrene-butadiene-styrene polymer modified bitumen using fluorescent microscopy and conventional test methods. *Journal of Hazardous Materials*, 150(2), 424-432.
- Sengoz, B., Topal, A. ve Gorkem, C. (2013). Evaluation of natural zeolite as warmmix asphalt additive and its comparison with other warm mix additives. *Construction and Building Materials*, 43(2013), 242-252
- Shen, J. A. (2011). Pavement performance of asphalt and asphalt concrete.
- Shirakawa, T., Tada, A. ve Okazaki, N. (2012). Development of functional carbon nanotubes-asphalt composites. *Int. J. Geomate*, 2(1), 161-165.

- Silverson. (2016). *Mixing with a high shear laboratory mixer*. 25 Eylül 2017, <http://www.silverson.com/us/products/laboratory-mixers/how-it-works>
- Simon, M. W., Stafford, K. T. ve Ou, D. L. (2008). Nanoclay reinforcement of liquid silicone rubber. *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*, 18(3), 364-373.
- Solaimanian, M., Bonaquist, R. F. ve Tandon, V. (2007). *Improved conditioning and testing procedures for HMA moisture susceptibility*, 589. Transportation Research Board.
- Steyn, W. J. (2009). Potential applications of nanotechnology in pavement engineering. *Journal of Transportation Engineering*, 135(10), 764-772.
- Stuart, K. D. (1990). Moisture damage in asphalt mixtures-a state-of-the-art report.
- Suryakanta, (2015). *Viscosity Test*. 16 Kasım 2017, <http://civilblog.org/2015/09/11/9-test-to-check-quality-of-bitumen-for-use-in-road-work/#>
- Taniguchi, N. (1974). On the basic concept of nano-technology. *Proceedings of the International Conference on Production Engineering Tokyo Part II*. Japan Society of Precision Engineering.
- Tanzadeh, J ve Kianfar, A. (2016). Decreasing Thermal Cracking on Asphalt Pavement by Nano Calcium Carbonate (CCN) Modified Bitumen. *Journal of Design and Built Environment*.
- Tcherbi-Narteh, A., Hosur, M. V., Triggs, E. ve Jelaani, S. (2013). Effects of surface treatments of montmorillonite nanoclay on cure behavior of diglycidyl ether of bisphenol an epoxy resin. *Journal of Nanoscience*, 2013.

- Tedja, R., Marquis, C., Lim, M. ve Amal, R. (2011). Biological impacts of TiO₂ on human lung cell lines A549 and H1299: particle size distribution effects. *Journal of Nanoparticle Research*, 13(9), 3801-3813.
- Teizer, J., Venugopal, M., Teizer, W. ve Felkl, J. (2011). Nanotechnology and its impact on construction: bridging the gap between researchers and industry professionals. *Journal of Construction Engineering and management*, 138(5), 594-604.
- Thomas, K. P., McKay, J. F. ve Branthaver, J. F. (2006). Surfactants in aged asphalt and impact μ on moisture susceptibility of laboratory-prepared mixes. *Road materials and pavement design*, 7(4), 477-490.
- Thomsen, C., Reich, S. ve Maultzsch, J. (2004). Carbon Nanotubes: Basic Concepts and Physical Properties. *Revista de Plasticos Modernos*.
- Tohme, P., Sebaali, P. E., Hajj, E. Y. ve Johnston, D. (2004). Effectiveness of antistripping additives for bituminous mixtures. *International Journal of Pavements*, 3(2).
- Topal, A., Sureshkumar, M. S., Sengoz, B. ve Polacco, G. (2012). Rheology and microstructure of polymer-modified asphalt nanocomposites. *International Journal of Materials Research*, 103(10), 1271-1276.
- Tsuji, J. S., Maynard, A. D., Howard, P. C., James, J. T., Lam, C. W., Warheit, D. B. ve Santamaria, A. B. (2005). Research strategies for safety evaluation of nanomaterials, part IV: risk assessment of nanoparticles. *Toxicological sciences*, 89(1), 42-50.
- Utracki, L. A. (2004). *Clay-containing polymeric nanocomposites* (Vol. 1). iSmithers Rapra Publishing.

- Van De Ven, M. F., Molenaar, A. A., Besamusca, J. ve Noordergraaf, J. (2008). *Nanotechnology for binders of asphalt mixtures. Proceedings of the 4th Eurasphalt And Eurobitume Congress Held May 2008, Copenhagen, Denmark.*
- Wang, C., Sheng, Y., Zhao, X., Zhao, J., Ma, X. ve Wang, Z. (2007). A novel aqueous-phase route to synthesize hydrophobic CaCO₃ particles in situ. *Materials Science and Engineering: C*, 27(1), 42-45.
- Wasiuddin, N. M., Howell, D. C., Fogle, C. M., Zaman, M. M. ve O'Rear, E. A. (2006). Acid-base characteristics of an asphalt binder with and without anti-strip additives. *Airfield and Highway Pavement: Meeting Today's Challenges with Emerging Technologies* (pp. 412-424).
- White, T. D. (1985). Marshall procedures for design and quality control of asphalt mixtures. *Association of asphalt paving technologists proc*, 54.
- Whiteoak, D. ve Read J. M. (2003). *The Shell bitumen handbook* (5. Baskı). London: Thomas Telford Services Ltd.
- Whiteoak, D. ve Read, J. M. (2015). *The Shell bitumen handbook* (6. Baskı) (251).
- Wittstock, G. (2000). ZL Wang (Ed.): *Characterization of nanophase materials. Journal of Solid State Electrochemistry*, 5(5), 367-368.
- Won, M. C. ve Ho, M. K. (1994). Effect of antistrip additives on the properties of polymer-modified asphalt binders and mixtures. *Transportation research record*, (1436).
- Yang, J. ve Tighe, S. (2013). A review of advances of nanotechnology in asphalt mixtures. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 96, 1269-1276.

- Yao, H., You, Z., Li, L., Lee, C. H., Wingard, D., Yap, Y. K., Shi, X. ve Goh, S. W. (2012). Rheological properties and chemical bonding of asphalt modified with nanosilica. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 25(11), 1619-1630.
- Yao, H., You, Z., Li, L., Shi, X., Goh, S. W., Mills-Beale, J. ve Wingard, D. (2012). Performance of asphalt binder blended with non-modified and polymer-modified nanoclay. *Construction and Building Materials*, 35, 159-170.
- Yarahmadi, N., Jakubowicz, I. ve Hjertberg, T. (2010). Development of poly (vinyl chloride)/montmorillonite nanocomposites using chelating agents. *Polymer degradation and stability*, 95(2), 132-137.
- You, Z., Mills-Beale, J., Foley, J. M., Roy, S., Odegard, G. M., Dai, Q. ve Goh, S. W. (2011). Nanoclay-modified asphalt materials: Preparation and characterization. *Construction and Building Materials*, 25(2), 1072-1078.
- Yu, J. Y., Feng, P. C., Zhang, H. L. ve Wu, S. P. (2009). Effect of organo-montmorillonite on aging properties of asphalt. *Construction and Building Materials*, 23(7), 2636-2640.
- Yu, J., Wang, L., Zeng, X., Wu, S. ve Li, B. (2007). Effect of montmorillonite on properties of styrene-butadiene-styrene copolymer modified bitumen. *Polymer Engineering & Science*, 47(9), 1289-1295.
- Yu, R., Fang, C., Liu, P., Liu, X. ve Li, Y. (2015). Storage stability and rheological properties of asphalt modified with waste packaging polyethylene and organic montmorillonite. *Applied Clay Science*, 104, 1-7.
- Yusoff, N. I. M., Breem, A. A. S., Alattug, H. N., Hamim, A. ve Ahmad, J. (2014). The effects of moisture susceptibility and ageing conditions on nano-silica/polymer-modified asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, 72, 139-147.

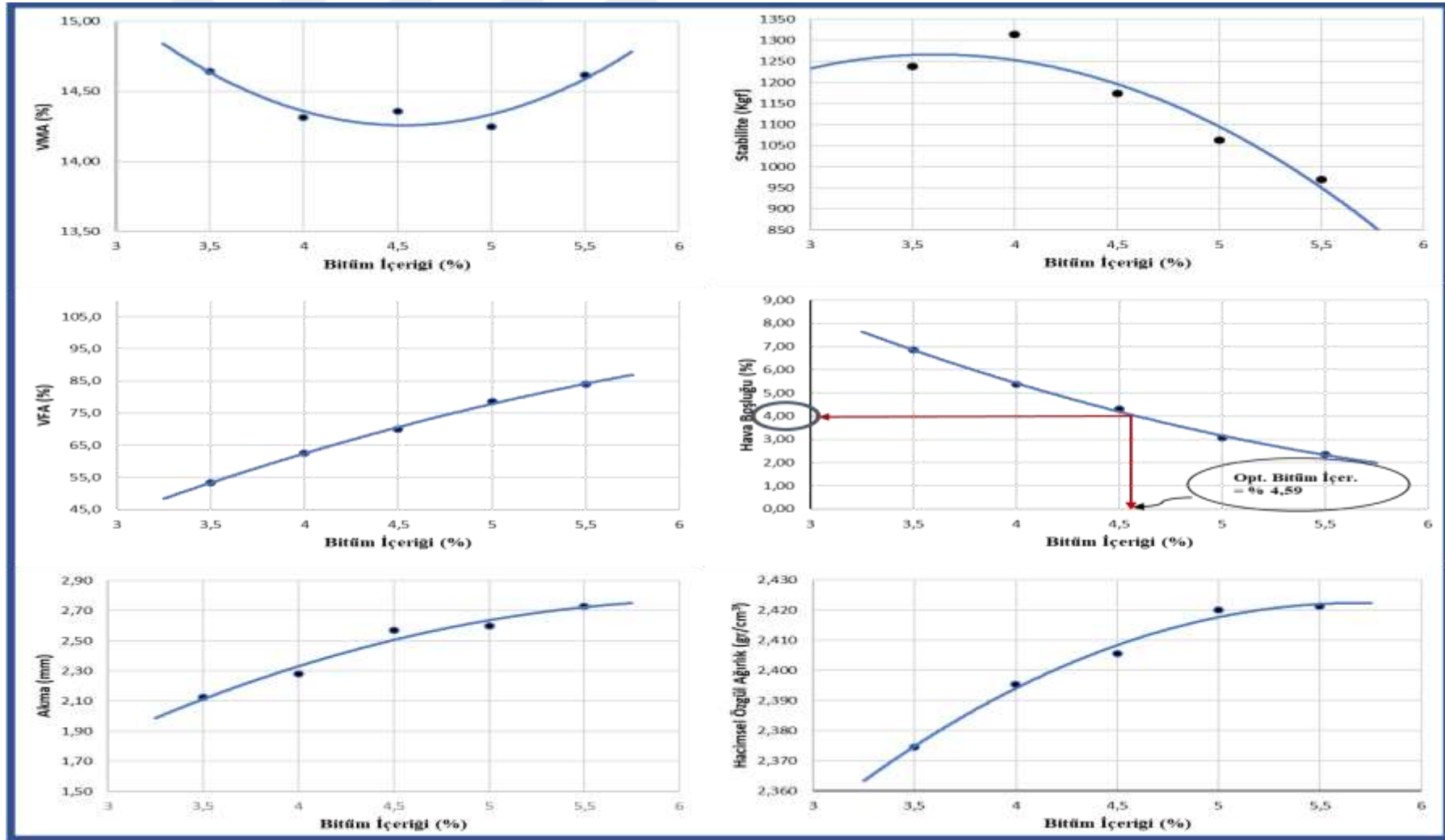
- Zaniewski, J. P. ve Kanneganti, V. (2003). Comparison of 19 mm Superpave and Marshall Base II Mixes in West Virginia. *Final Report, Prepared for the West Virginia Department of Transportation, Division of Highways, in cooperation with the US Department of Transportation, Federal Highway Administration.*
- Zare-Shahabadi, A., Shokuhfar, A. ve Ebrahimi-Nejad, S. (2010a). Microstructure and properties of nanoclay reinforced asphalt binders. *Defect and Diffusion Forum*, 297, 579-583. Trans Tech Publications.
- Zare-Shahabadi, A., Shokuhfar, A. ve Ebrahimi-Nejad, S. (2010b). Preparation and rheological characterization of asphalt binders reinforced with layered silicate nanoparticles. *Construction and Building Materials*, 24(7), 1239-1244.
- Zhao, G. J. ve Guo, P. (2012). Workability of Sasobit warm mixture asphalt. *Energy Procedia*, 16, 1230-1236.
- Zhu, W., Bartos, P. ve Porro, A. (2004). Application of nanotechnology in construction. *Materials and Structures*. 37(9): 649–658.
- Zydex. (2012). Laboratory Test Protocol – Nano-organosilan – Mixing protocol. Zydex Industries, India
- Zydex. (2013). Material Safety Data Sheet of Nano-organosilan. Zydex Industries, India

EK 1
MARSHALL KARIŞIM TASARIMI



Tablo A.1 Saf bitüm için Marshall karışım tasarımı verileri

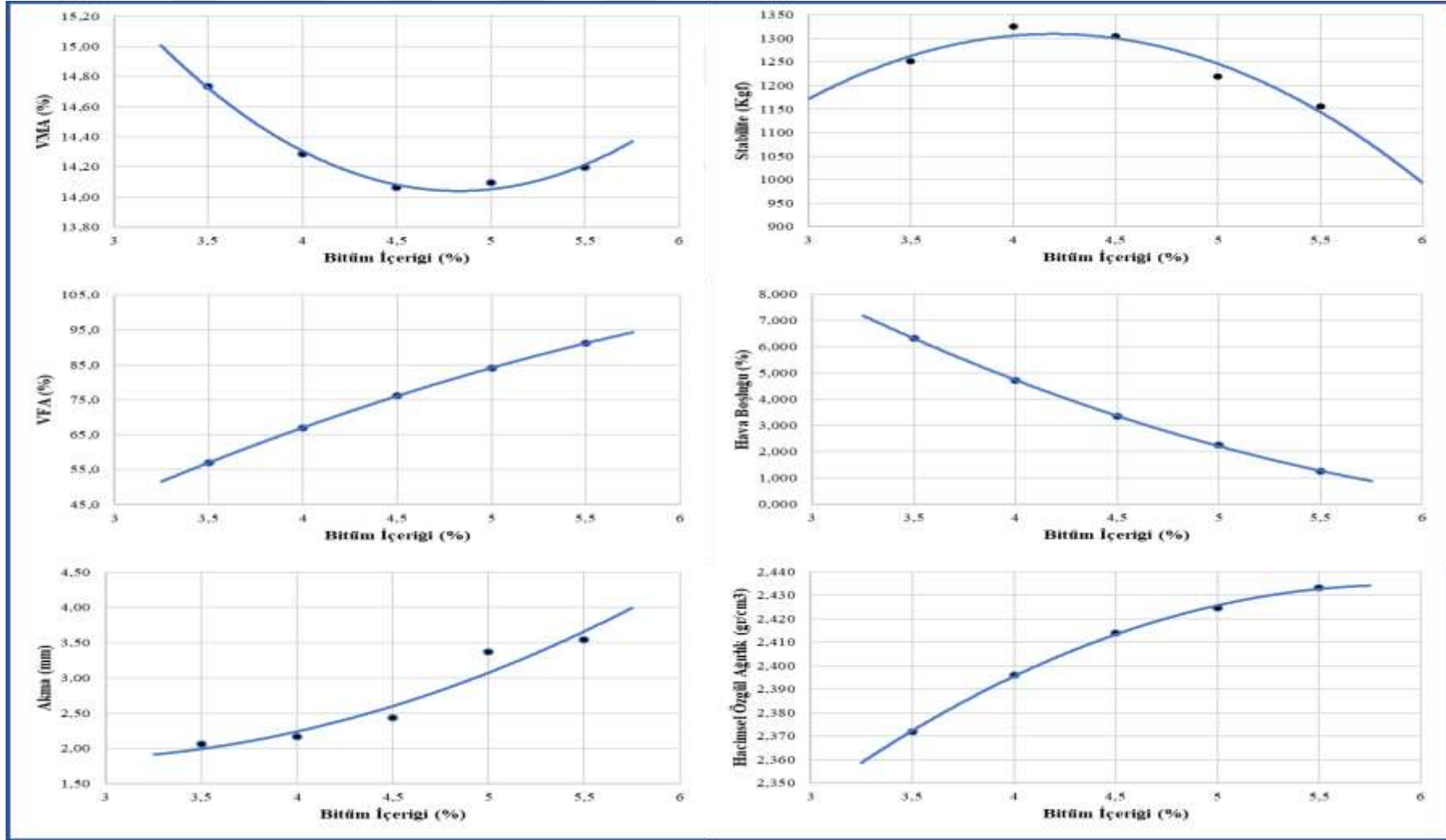
Bitüm %		Numune No.	Numune Yüksekliği (mm)				Havadaki Ağırlık (gr.)	Sudaki Ağırlık (gr.)	DYKA (gr.)	Numune Hacmi	Hacim Özg. Ağ.	Hacim Yoğunluğu	Maks. Teo. Özg. Ağ.	Hava Boşluğu	VMA	VFA	Akma	Marshall Stabilesitesi	Düzeltilme Faktörü	Düzeltilmiş Marshall Stabilesitesi
Agrega	Akarışım		1	2	3	Ort.	W _h	W _s	W _{DYKA}	V	G _{mb}	D _p	D _t	V _h (%)	%	%	mm	Kgf	Faktör	Kgf
3,5	3,4	A	62,6	62,8	63,1	62,8	1182,5	692,7	1188,4	495,7	2,386	2,378	2,557	6,708	14,51	53,8	2,24	1229	1,018	1251
		B	62,4	62,5	62,6	62,5	1181,0	690,6	1186,3	495,7	2,382	2,375	2,557	6,827	14,62	53,8	2,02	1149	1,025	1178
		C	62,7	62,9	63,1	62,9	1182,7	692,7	1190,2	497,5	2,377	2,370	2,557	7,030	14,80	52,5	2,12	1232	1,043	1285
		Ort.									2,382	2,375		6,855	14,64	53,4	2,13			1238
4	3,8	A	62,3	61,9	61,7	62,0	1184,9	692,5	1186,3	493,8	2,400	2,392	2,539	5,490	14,42	61,9	2,12	1297	1,038	1346
		B	61,5	61,6	61,7	61,6	1190,2	693,7	1190,7	497,0	2,395	2,388	2,539	5,679	14,59	61,1	2,36	1294	1,049	1357
		C	61,7	61,9	61,7	61,8	1187,6	696,5	1188,6	492,1	2,413	2,406	2,539	4,948	13,93	64,5	2,36	1187	1,043	1238
		Ort.									2,403	2,395		5,372	14,31	62,5	2,28			1314
4,5	4,3	A	61,7	61,8	61,9	61,8	1191,8	699,3	1193,2	493,9	2,413	2,406	2,521	4,293	14,35	70,1	2,48	1127	1,043	1175
		B	61,4	61,5	61,9	61,6	1190,0	696,2	1191,0	494,8	2,405	2,398	2,521	4,612	14,64	68,5	2,85	1116	1,049	1171
		C	61,3	61,3	61,1	61,2	1192,3	700,8	1193,4	492,6	2,420	2,413	2,521	4,000	14,09	71,6	2,38	1108	1,062	1177
		Ort.									2,413	2,406		4,302	14,36	70,1	2,57			1174
5	4,8	A	60,8	60,8	61,1	60,9	1183,9	696,5	1184,4	487,9	2,427	2,419	2,504	3,095	14,28	78,3	2,73	949	1,071	1016
		B	60,7	60,7	60,8	60,7	1197,8	705,6	1198,7	493,1	2,429	2,422	2,504	2,991	14,19	78,9	2,67	975	1,078	1051
		C	61,2	61,3	61,4	61,3	1195,1	703,0	1195,5	492,5	2,427	2,419	2,504	3,092	14,28	78,3	2,4	1059	1,059	1121
		Ort.									2,427	2,420		3,059	14,25	78,5	2,60			1063
5,5	5,2	A	61,2	61,4	61,3	61,3	1196,4	704,4	1196,7	492,3	2,430	2,423	2,487	2,289	14,56	84,3	2,66	864	1,059	915
		B	60,9	61,1	61,0	61,0	1197,8	705,7	1198,1	492,4	2,433	2,425	2,487	2,194	14,48	84,8	3	979	1,068	1046
		C	61,3	60,9	61,3	61,2	1195,9	702,5	1196,1	493,6	2,423	2,416	2,487	2,587	14,82	82,5	2,53	895	1,062	950
		Ort.									2,429	2,421		2,357	14,62	83,9	2,73			970



Şekil A.1 Saf bitüm için Marshall karışım tasarımı grafikleri

Tablo A.2 %2 Nano-Bentonit katkılı karışım için Marshall karışım tasarımı verileri

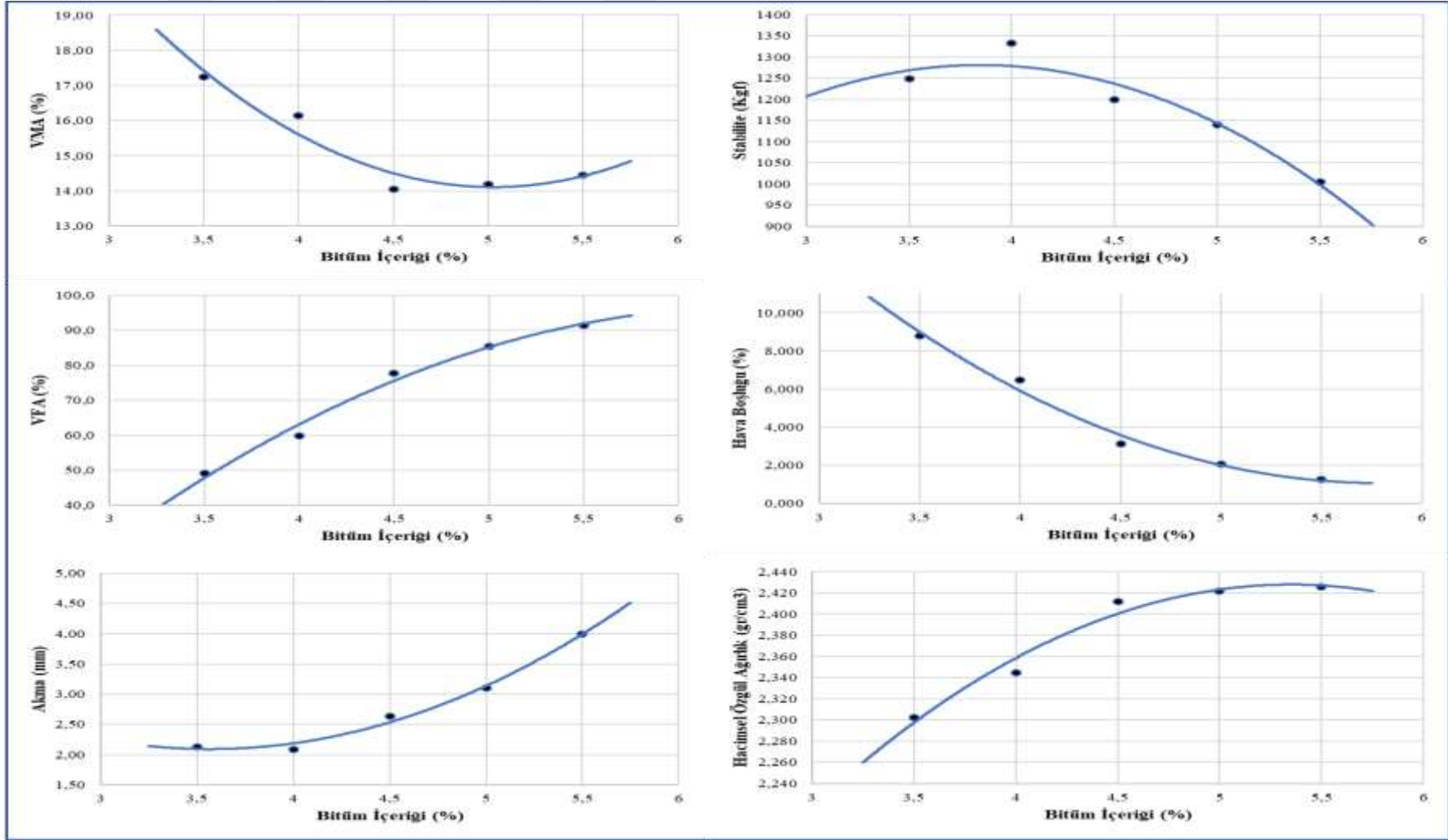
Bitüm %	Numune No.	Numune Yüksekliği (mm)				Havadaki Ağırlık (gr.)	Sudaki Ağırlık (gr.)	DYKA (gr.)	Numune Hacmi	Hacim Özg. Ağ.	Hacim Yoğunluğu	Maks. Teo. Özg. Ağ.	Hava Boşluğu	VMA	VFA	Akma	Marshall Stabilitesi	Düzelme Faktörü	Düzeltilmiş Marshall Stabilitesi	
		1	2	3	Ort.															W _h
3,5	3,4	A	62,1	62,0	62,0	62,0	1178,8	687,3	1182,6	495,3	2,380	2,373	2,540	6,303	14,71	57,1	2,05	1188	1,038	1233
		B	62,7	62,9	62,8	62,8	1182,9	692,7	1190,1	497,4	2,378	2,371	2,540	6,374	14,77	56,9	2,42	1149	1,018	1170
		C	62,9	62,5	62,7	62,7	1183,7	692,7	1190,2	497,5	2,379	2,372	2,540	6,330	14,73	57,0	1,71	1326	1,02	1353
		Ort.									2,379	2,372		6,336	14,74	57,0	2,06			1252
4	3,8	A	62,0	62,0	61,9	62,0	1190,8	697,4	1192,2	494,8	2,407	2,399	2,522	4,586	14,17	67,6	2,42	1256	1,038	1304
		B	62,0	62,1	62,3	62,1	1187,1	695,8	1190,5	494,7	2,400	2,392	2,522	4,863	14,42	66,3	1,96	1232	1,035	1275
		C	61,8	61,8	62,3	62,0	1183,0	693,8	1186,0	492,2	2,403	2,396	2,522	4,710	14,28	67,0	2,11	1348	1,038	1399
		Ort.									2,403	2,396		4,720	14,29	67,0	2,16			1326
4,5	4,3	A	61,4	61,1	62,0	61,5	1192,3	700,9	1193,8	492,9	2,419	2,412	2,505	3,433	14,14	75,7	2,19	1139	1,053	1199
		B	61,5	61,1	60,8	61,1	1192,0	701,6	1192,6	491,0	2,428	2,420	2,505	3,083	13,83	77,7	2,19	1300	1,065	1385
		C	61,9	61,4	61,9	61,7	1188,3	697,3	1189,0	491,7	2,417	2,409	2,505	3,522	14,22	75,2	2,93	1273	1,046	1332
		Ort.									2,421	2,414		3,346	14,06	76,2	2,44			1305
5	4,8	A	61,2	61,7	61,5	61,5	1196,5	703,8	1197,2	493,4	2,425	2,418	2,488	2,530	14,34	82,3	3,4	1074	1,053	1131
		B	60,9	60,7	61,1	60,9	1199,5	707,2	1199,6	492,4	2,436	2,429	2,488	2,088	13,95	85,0	3,57	1228	1,071	1315
		C	61,1	61,3	61,3	61,2	1197,2	707,6	1199,4	491,8	2,434	2,427	2,488	2,156	14,01	84,6	3,15	1141	1,062	1212
		Ort.									2,432	2,424		2,258	14,10	84,0	3,37			1219
5,5	5,2	A	61,3	61,7	61,4	61,5	1197,5	708,0	1198,0	490,0	2,444	2,437	2,471	1,113	14,08	92,1	3,62	1069	1,053	1126
		B	61,2	61,4	61,8	61,5	1201,0	709,7	1201,4	491,7	2,443	2,435	2,471	1,167	14,12	91,7	3,96	1160	1,053	1221
		C	61,2	61,9	61,8	61,6	1201,0	708,1	1201,3	493,2	2,435	2,428	2,471	1,468	14,39	89,8	3,04	1069	1,049	1121
		Ort.									2,441	2,433		1,249	14,20	91,2	3,54			1156



Şekil A.2 %2 Nano-Bentonit katkıli karışım için Marshall karışım tasarımı grafikleri

Tablo A.2 %4 Nano-Bentonit katkılı karışım için Marshall karışım tasarımı verileri

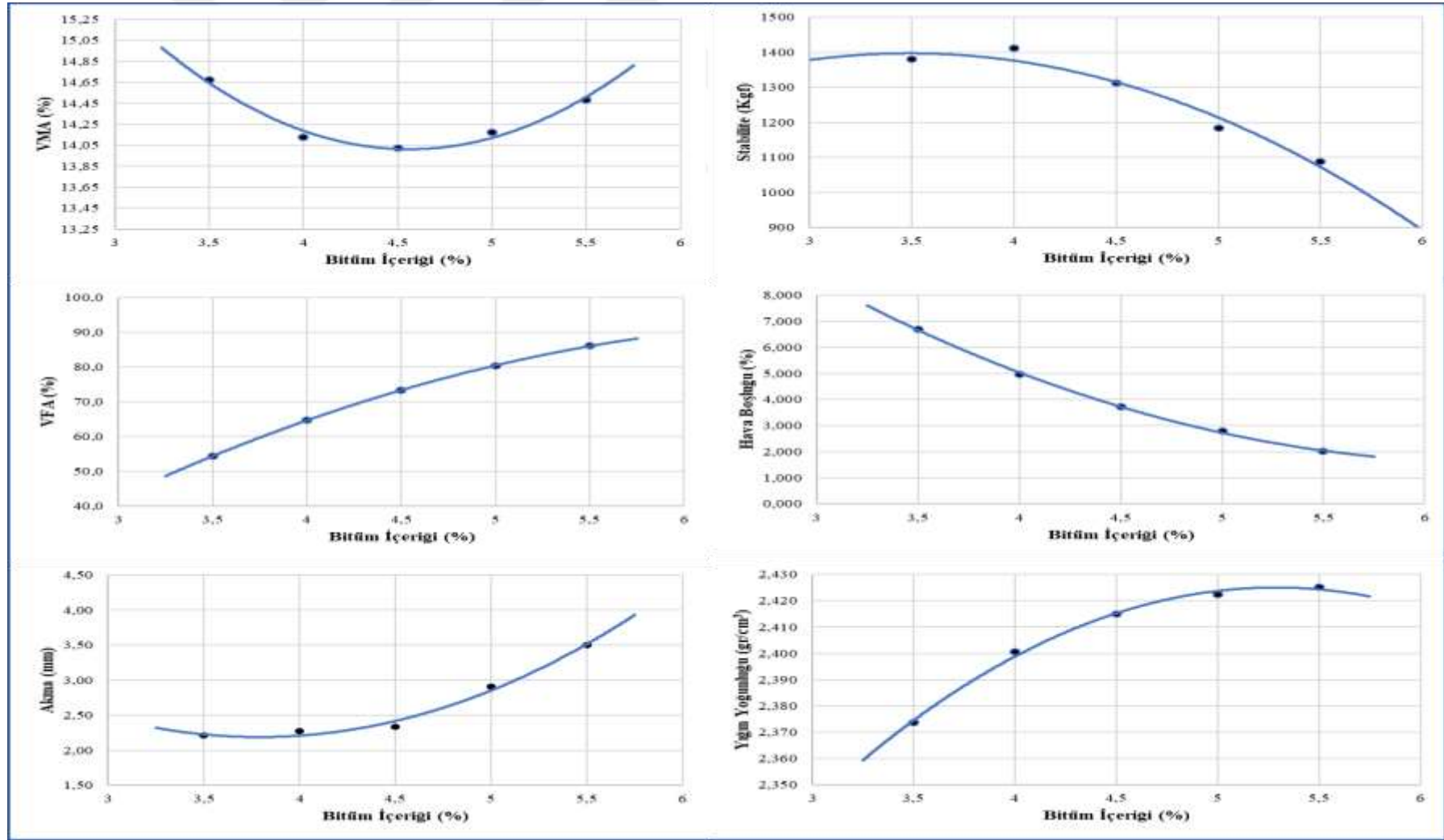
Bitüm %	Agrega	Akarişım	Numune No.	Numune Yüksekliği (mm)				Havadaki Ağırlık (gr.)	Sudaki Ağırlık (gr.)	DYKA (gr.)	Numune Hacmi	Hacim Özg. Ağ.	Hacim Yoğunluğu	Maks. Teo. Özg. Ağ.	Hava Boşluğu	VMA	VFA	Akma	Marshall Stabilitesi	Düzelme Faktörü	Düzeltilmiş Marshall Stabilitesi
				1	2	3	Ort.														
3,5		3,4	A	62,2	62,5	62,4	62,4	1179,7	675,4	1186,6	511,2	2,308	2,301	2,532	8,862	17,30	48,8	1,85	1243	1,028	1278
			B	62,6	62,9	63,3	62,9	1179,3	672,3	1184,9	512,6	2,301	2,294	2,532	9,142	17,55	47,9	2,34	1193	1,015	1211
			C	62,9	63,2	63,3	63,1	1182,7	680,0	1189,8	509,8	2,320	2,313	2,532	8,380	16,86	50,3	2,19	1244	1,01	1256
			Ort.											2,309	2,302		8,795	17,24	49,0	2,13	
4		3,8	A	61,6	62,1	61,7	61,8	1189,9	684,1	1192,0	507,9	2,343	2,336	2,514	6,829	16,44	58,5	2,37	1257	1,043	1311
			B	61,5	61,7	61,5	61,6	1186,1	683,6	1187,9	504,3	2,352	2,345	2,514	6,463	16,12	59,9	1,79	1266	1,049	1328
			C	62,0	62,1	62,4	62,2	1188,7	686,5	1190,2	503,7	2,360	2,353	2,514	6,146	15,83	61,2	2,11	1212	1,033	1357
			Ort.											2,352	2,345		6,479	16,13	59,9	2,09	
4,5		4,3	A	62,7	62,5	62,4	62,5	1190,3	699,5	1191,5	492,0	2,419	2,412	2,497	3,122	14,13	77,9	2,94	1194	1,025	1224
			B	61,3	61,0	60,9	61,1	1189,6	698,6	1189,9	491,3	2,421	2,414	2,497	3,041	13,80	78,0	2,09	1180	1,065	1257
			C	61,7	61,7	61,5	61,6	1194,2	700,9	1195,1	494,2	2,416	2,409	2,497	3,237	14,23	77,3	2,88	1064	1,049	1116
			Ort.											2,419	2,412		3,133	14,05	77,7	2,64	
5		4,8	A	61,3	61,7	61,9	61,6	1187,9	699,0	1188,5	489,5	2,427	2,419	2,480	2,164	14,27	84,8	2,82	1184	1,049	1242
			B	61,4	61,3	61,7	61,5	1197,6	705,5	1198,0	492,5	2,432	2,424	2,480	1,966	14,10	86,1	3,38	950	1,053	1000
			C	61,6	61,7	61,5	61,6	1196,4	704,3	1196,8	492,5	2,429	2,422	2,480	2,064	14,19	85,4	3,1	1125	1,049	1180
			Ort.											2,429	2,422		2,065	14,19	85,4	3,10	
5,5		5,2	A	61,2	61,2	61,4	61,3	1197,5	705,1	1198,0	492,9	2,429	2,422	2,464	1,400	14,58	90,4	4,17	854	1,059	904
			B	61,0	61,1	61,3	61,1	1191,9	701,8	1192,2	490,4	2,430	2,423	2,464	1,361	14,55	90,6	3,85	961	1,065	1023
			C	60,9	61,0	61,4	61,1	1197,2	706,6	1197,4	490,8	2,439	2,432	2,464	1,003	14,24	93,0	3,96	1023	1,065	1089
			Ort.											2,433	2,426		1,255	14,46	91,3	3,99	



Şekil A.3 %4 Nano-Bentonit katkıli karışım için Marshall karışım tasarımı grafikleri

Tablo A.4 %6 Nano-Bentonit katkılı karışım için Marshall karışım tasarımı verileri

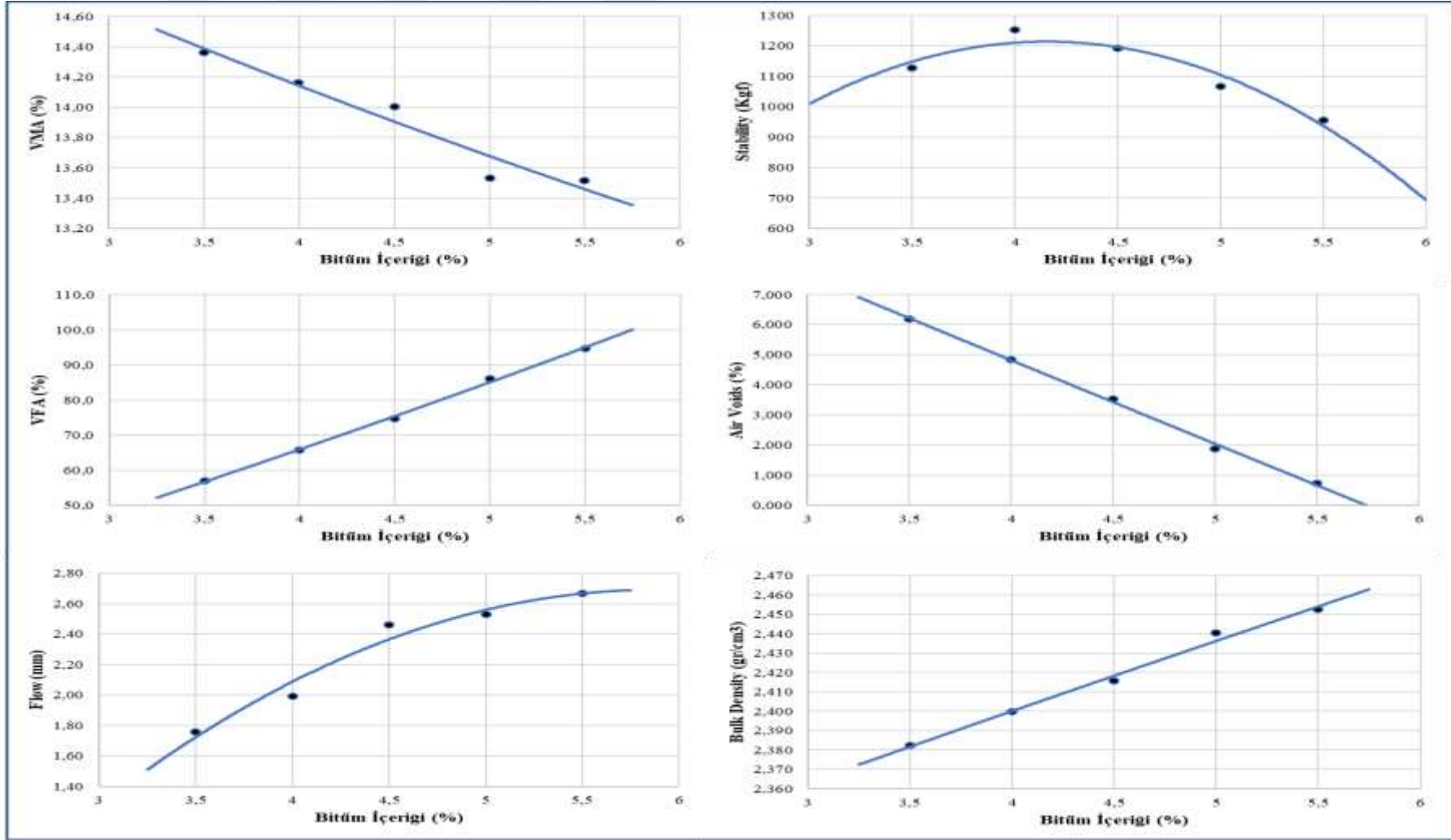
Bitüm %	Numune No.	Numune Yüksekliği (mm)				Havadaki Ağırlık (gr.)	Sudaki Ağırlık (gr.)	DYKA (gr.)	Numune Hacmi	Hacim Özg. Ağ.	Hacim Yoğunluğu	Maks. Teo. Özg. Ağ.	Hava Boşluğu	VMA	VFA	Akma	Marshall Stabilesi	Düzelme Faktörü	Düzeltilmiş Marshall Stabilesi	
		1	2	3	Ort.															W _h
3,5	3,4	A	62,4	62,4	62,5	62,4	1190,1	695,1	1194,5	499,4	2,383	2,376	2,552	6,613	14,60	54,7	1,8	1292	1,028	1328
		B	62,5	62,4	62,4	62,4	1185,1	692,2	1189,4	497,2	2,384	2,376	2,552	6,594	14,58	54,8	2,59	1362	1,028	1400
		C	62,4	62,1	62,3	62,3	1179,0	688,3	1184,5	496,2	2,376	2,369	2,552	6,887	14,85	53,6	2,24	1370	1,03	1411
		Ort.									2,381	2,374		6,698	14,68	54,4	2,21			1380
4	3,8	A	62,2	61,9	61,8	62,0	1187,7	694,1	1189,5	495,4	2,397	2,390	2,534	5,381	14,49	62,9	2,65	1353	1,038	1404
		B	62,1	61,8	61,9	61,9	1182,2	692,9	1184,6	491,7	2,404	2,397	2,534	5,111	14,25	64,1	2,01	1354	1,04	1408
		C	61,5	61,6	61,5	61,5	1183,2	695,8	1184,4	488,6	2,422	2,414	2,534	4,428	13,63	67,5	2,15	1348	1,053	1419
		Ort.									2,408	2,401		4,973	14,13	64,8	2,27			1411
4,5	4,3	A	61,4	61,3	61,6	61,4	1193,9	701,2	1194,5	493,3	2,420	2,413	2,516	3,815	14,10	72,9	2,59	1300	1,056	1373
		B	61,4	61,6	61,3	61,4	1193,4	701,4	1194,0	492,6	2,423	2,415	2,516	3,719	14,01	73,5	2,06	1199	1,056	1266
		C	61,5	61,1	61,6	61,4	1182,0	695,3	1182,9	487,6	2,424	2,417	2,516	3,661	13,96	73,8	2,35	1227	1,056	1296
		Ort.									2,422	2,415		3,732	14,02	73,4	2,33			1312
5	4,8	A	61,5	61,2	61,3	61,3	1193,7	702,6	1194,0	491,4	2,429	2,422	2,499	2,796	14,19	80,3	3,17	1116	1,059	1182
		B	61,5	61,0	61,1	61,2	1195,0	702,5	1195,5	493,0	2,424	2,417	2,499	3,006	14,37	79,1	2,82	1086	1,062	1153
		C	60,9	60,9	61,2	61,0	1201,0	707,1	1200,2	493,1	2,436	2,428	2,499	2,539	13,96	81,8	2,73	1137	1,068	1214
		Ort.									2,430	2,422		2,780	14,17	80,4	2,91			1183
5,5	5,2	A	61,4	61,6	61,4	61,5	1209,0	712,9	1209,2	496,3	2,436	2,429	2,482	1,863	14,35	87,0	3,29	1022	1,053	1076
		B	61,1	61,4	61,6	61,4	1196,7	704,6	1197,0	492,4	2,430	2,423	2,482	2,092	14,55	85,6	3,37	1113	1,056	1175
		C	61,0	61,4	61,1	61,2	1201,5	707,2	1201,5	494,3	2,431	2,423	2,482	2,078	14,54	85,7	3,85	955	1,062	1014
		Ort.									2,432	2,425		2,011	14,48	86,1	3,50			1089



Şekil A.4 %6 Nano-Bentonit katkıli karışım için Marshall karışım tasarımı grafikleri

Tablo A.5 %3 Nano-CaCO₃ katkılı karışım için Marshall karışım tasarımı verileri

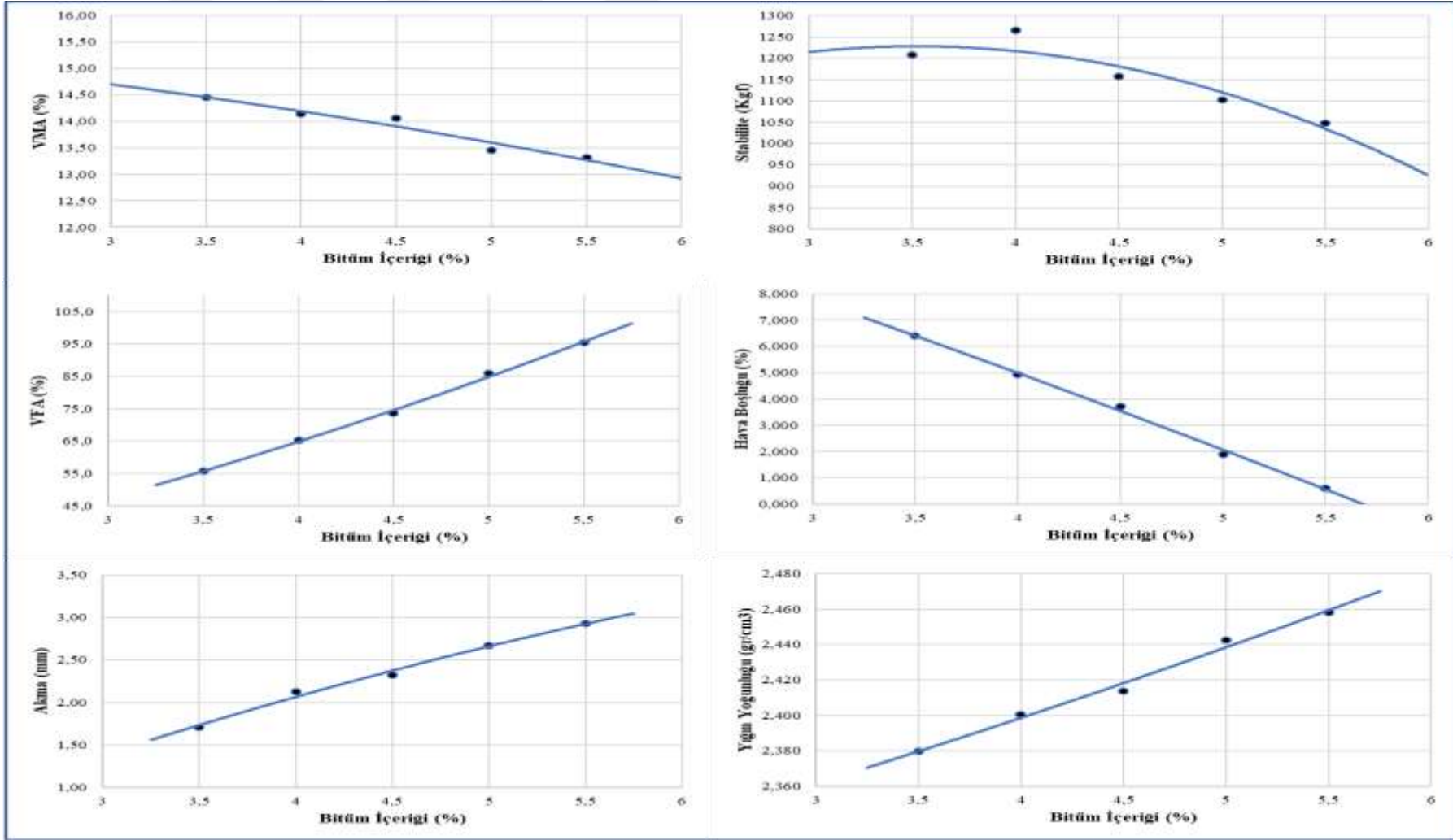
Bitüm %	Numune No.	Numune Yüksekliği (mm)				Havadaki Ağırlık (gr.)	Sudaki Ağırlık (gr.)	DYKA (gr.)	Numune Hacmi	Hacim Özg. Ağ.	Hacim Yoğunluğu	Maks. Teo. Özg. Ağ.	Hava Boşluğu	VMA	VFA	Akma	Marshall Stabilesitesi	Düzeltilme Faktörü	Düzeltilmiş Marshall Stabilesitesi	
		1	2	3	Ort.	W _h	W _s	W _{DYKA}	V	G _{mb}	D _p	D _t	V _h (%)	%	%	mm	Kgf	Faktör	Kgf	
3,5	3,4	A	62,5	62,5	62,6	62,5	1180,4	690,3	1184,0	493,7	2,391	2,384	2,547	6,133	14,32	57,2	1,52	1107	1,025	1135
		B	62,3	62,3	62,6	62,4	1180,6	690,2	1183,8	493,6	2,392	2,385	2,547	6,098	14,28	57,3	1,79	1102	1,028	1133
		C	62,7	62,7	62,9	62,8	1185,6	695,1	1192,0	496,9	2,386	2,379	2,547	6,326	14,49	56,3	1,96	1097	1,018	1117
		Ort.									2,390	2,382		6,186	14,36	56,9	1,76		1128	
4	3,8	A	61,7	61,7	61,7	61,7	1185,8	696,4	1189,0	492,6	2,407	2,400	2,529	4,823	14,15	65,9	1,97	1257	1,046	1315
		B	61,3	61,1	61,7	61,4	1188,9	698,0	1191,8	493,8	2,408	2,400	2,529	4,807	14,13	66,0	1,92	1166	1,056	1231
		C	61,2	61,0	61,1	61,1	1187,2	697,5	1191,0	493,5	2,406	2,398	2,529	4,885	14,20	65,6	2,09	1138	1,065	1212
		Ort.									2,407	2,400		4,838	14,16	65,8	1,99		1253	
4,5	4,3	A	60,9	61,1	61,1	61,0	1195,3	705,0	1198,0	493,0	2,425	2,417	2,512	3,471	13,94	75,1	2,88	1176	1,068	1256
		B	61,1	60,9	61,1	61,0	1192,0	703,3	1196,0	492,7	2,419	2,412	2,512	3,679	14,13	74,0	2,48	1139	1,068	1216
		C	61,8	61,7	61,6	61,7	1190,5	700,0	1191,0	491,0	2,425	2,417	2,512	3,467	13,94	75,1	2,02	1055	1,046	1104
		Ort.									2,423	2,416		3,539	14,00	74,7	2,46		1192	
5	4,8	A	61,0	61,5	61,2	61,2	1199,3	710,3	1199,7	489,4	2,451	2,443	2,495	1,767	13,43	86,8	2,93	1106	1,062	1175
		B	61,9	61,4	61,5	61,6	1198,5	708,1	1199,0	490,9	2,441	2,434	2,495	2,133	13,76	84,5	2,52	932	1,049	978
		C	61,7	61,3	61,6	61,5	1197,2	709,2	1197,6	488,4	2,451	2,444	2,495	1,739	13,41	87,0	2,14	998	1,053	1051
		Ort.									2,448	2,440		1,880	13,53	86,1	2,53		1068	
5,5	5,2	A	60,9	61,3	61,4	61,2	1199,7	712,7	1200,0	487,3	2,462	2,455	2,478	0,646	13,44	95,2	2,6	936	1,062	994
		B	61,2	61,3	61,3	61,3	1202,3	714,0	1202,5	488,5	2,461	2,454	2,478	0,675	13,47	95,0	2,7	842	1,059	892
		C	61,4	61,4	61,6	61,5	1203,4	713,9	1203,8	489,9	2,456	2,449	2,478	0,869	13,64	93,6	2,7	932	1,053	981
		Ort.									2,460	2,452		0,730	13,52	94,6	2,67		956	



Şekil A.5 %3 Nano-CaCO₃ katkıli karışım için Marshall karışım tasarımı grafikleri

Tablo A.6 %6 Nano-CaCO₃ katkılı karışım için Marshall karışım tasarımı verileri

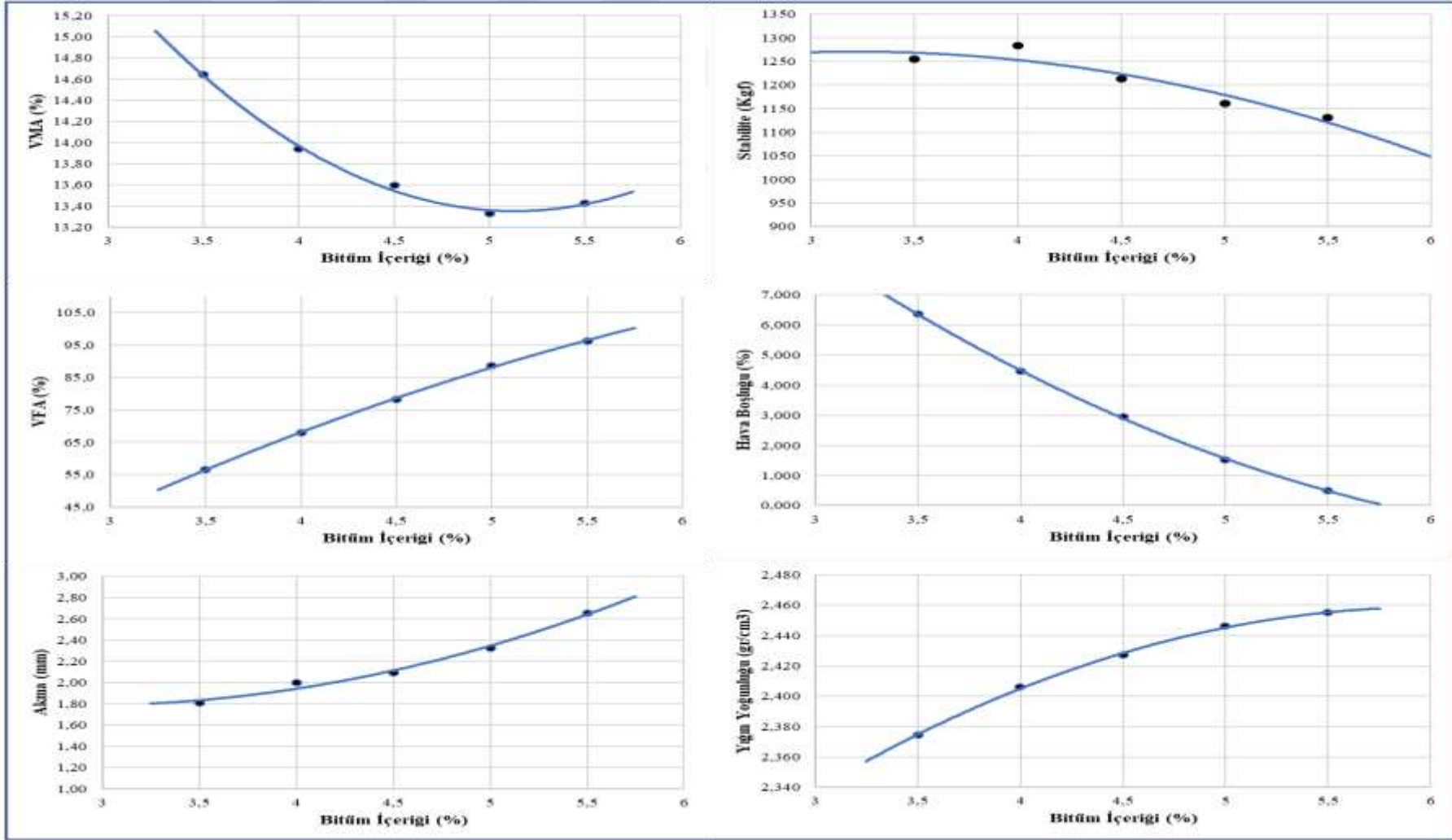
Bitüm %	Numune No.	Numune Yüksekliği (mm)				Havadaki Ağırlık (gr.)	Sudaki Ağırlık (gr.)	DYKA (gr.)	Numune Hacmi	Hacim Özg. Ağ.	Hacim Yoğunluğu	Maks. Teo. Özg. Ağ.	Hava Boşluğu	VMA	VFA	Akna	Marshall Stabilitesi	Düzelme Faktörü	Düzeltilmiş Marshall Stabilitesi	
		1	2	3	Ort.															W _h
3,5	3,4	A	62,2	62,0	62,0	62,1	1181,3	692,5	1185,4	492,9	2,397	2,389	2,550	6,020	14,11	57,3	1,75	1146	1,035	1186
		B	61,8	62,0	62,1	62,0	1181,1	686,5	1184,4	497,9	2,372	2,365	2,550	6,980	14,99	53,4	1,61	1180	1,038	1225
		C	62,1	62,2	61,8	62,0	1181,5	691,2	1185,2	494,0	2,392	2,385	2,550	6,213	14,29	56,5	1,77	1166	1,038	1210
		Ort.									2,387	2,380		6,404	14,46	55,8	1,71			1207
4	3,8	A	61,3	61,7	61,6	61,5	1191,0	698,7	1192,8	494,1	2,410	2,403	2,532	4,808	14,03	65,7	2,18	1224	1,053	1289
		B	61,6	61,7	61,5	61,6	1186,0	695,2	1187,3	492,1	2,410	2,403	2,532	4,822	14,04	65,7	2,09	1193	1,049	1251
		C	62,3	62,8	62,6	62,6	1190,1	695,9	1191,4	495,5	2,402	2,395	2,532	5,148	14,34	64,1	2,12	1229	1,023	1257
		Ort.									2,407	2,400		4,926	14,14	65,2	2,13			1266
4,5	4,3	A	61,0	61,5	61,2	61,2	1190,8	701,8	1193,2	491,4	2,423	2,416	2,515	3,633	13,99	74,0	1,91	1098	1,062	1166
		B	61,2	60,8	61,3	61,1	1194,1	705,1	1199,0	493,9	2,418	2,410	2,515	3,855	14,19	72,8	2	1078	1,065	1148
		C	61,5	61,7	61,8	61,7	1197,2	705,8	1200,0	494,2	2,423	2,415	2,515	3,664	14,01	73,9	3,05	1106	1,046	1157
		Ort.									2,421	2,414		3,717	14,06	73,6	2,32			1157
5	4,8	A	61,0	61,2	61,4	61,2	1199,3	710,6	1199,6	489,0	2,453	2,445	2,497	1,799	13,36	86,5	2,58	1050	1,062	1115
		B	61,6	61,7	61,7	61,7	1198,7	709,9	1199,3	489,4	2,449	2,442	2,497	1,929	13,48	85,7	2,85	1060	1,046	1109
		C	61,4	61,4	61,2	61,3	1199,1	709,6	1199,4	489,8	2,448	2,441	2,497	1,976	13,52	85,4	2,57	1022	1,059	1082
		Ort.									2,450	2,443		1,901	13,45	85,9	2,67			1102
5,5	5,2	A	61,5	61,7	61,4	61,5	1214,5	723,0	1214,9	491,9	2,469	2,462	2,481	0,473	13,19	96,4	3,4	1014	1,053	1068
		B	61,1	61,6	61,3	61,3	1204,7	715,2	1204,8	489,6	2,461	2,453	2,481	0,813	13,49	94,0	2,36	910	1,059	964
		C	61,2	61,3	61,3	61,3	1203,2	715,7	1203,5	487,8	2,467	2,459	2,481	0,571	13,28	95,7	3,03	1050	1,059	1112
		Ort.									2,465	2,458		0,619	13,32	95,4	2,93			1048



Şekil A.6 %6 Nano-CaCO₃ katkıli karışım için Marshall karışım tasarımı grafikleri

Tablo A.7 %9 Nano-CaCO₃ katkılı karışım için Marshall karışım tasarımı verileri

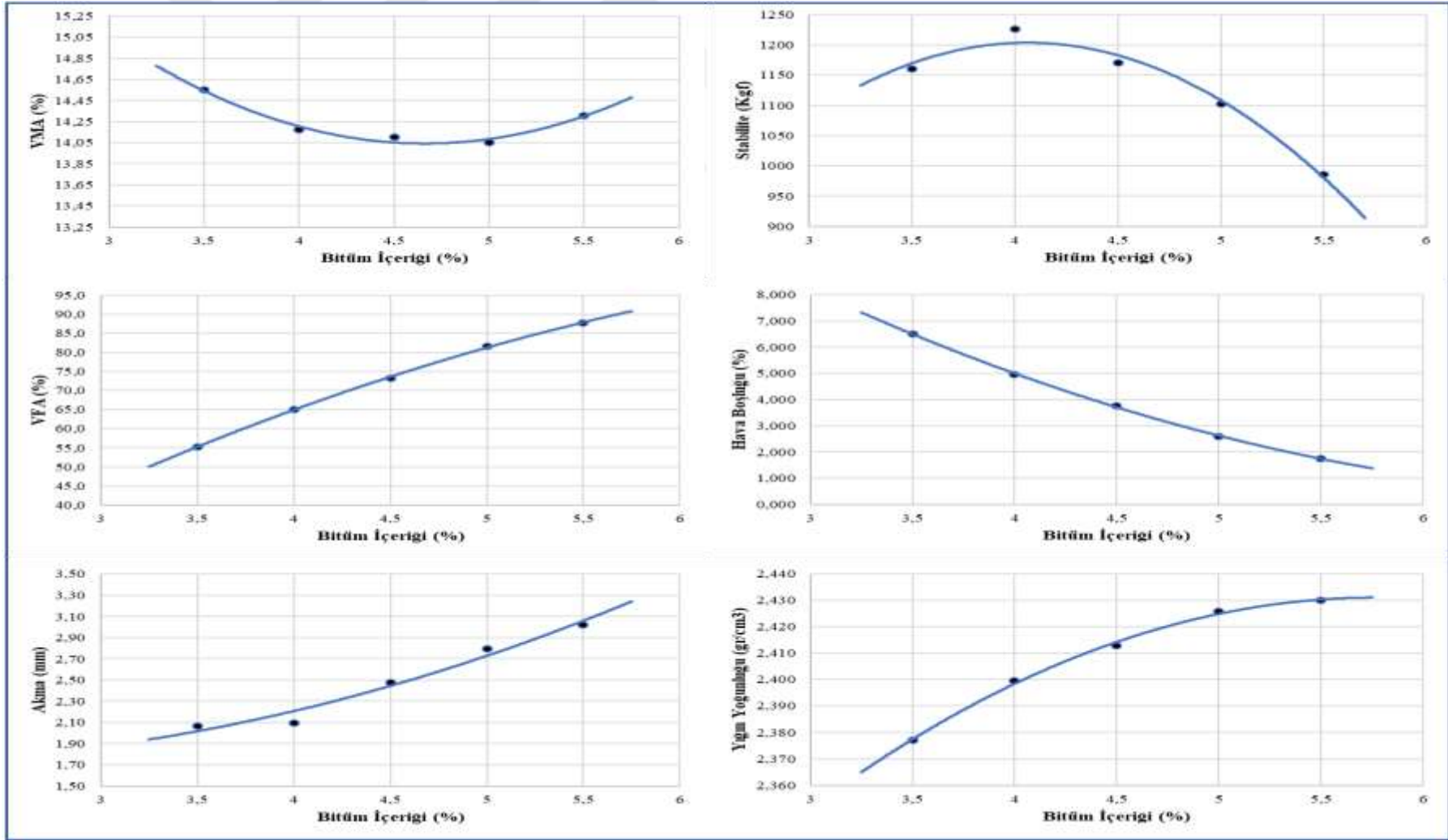
Bitüm %	Numune No.	Numune Yüksekliği (mm)				Havadaki Ağırlık (gr.)	Sudaki Ağırlık (gr.)	DYKA (gr.)	Numune Hacmi	Hacim Özg. Ağ.	Hacim Yoğunluğu	Maks. Teo. Özg. Ağ.	Hava Boşluğu	VMA	VFA	Akma	Marshall Stabilitesi	Düzelme Faktörü	Düzeltilmiş Marshall Stabilitesi	
		1	2	3	Ort.															W _h
3,5	3,4	A	62,3	62,6	62,3	62,4	1181,0	689,8	1186,7	496,9	2,377	2,370	2,544	6,567	14,82	55,7	1,75	1225	1,028	1259
		B	62,0	61,9	62,0	62,1	1180,0	687,4	1184,5	497,1	2,374	2,367	2,544	6,684	14,93	55,2	2,03	1180	1,035	1221
		C	62,1	62,3	61,9	62,1	1184,3	696,2	1190,7	494,5	2,395	2,388	2,544	5,851	14,17	58,7	1,65	1240	1,035	1283
		Ort.									2,382	2,375		6,367	14,64	56,5	1,81			1255
4	3,8	A	61,8	62,0	62,2	62,0	1188,8	697,4	1190,1	492,7	2,413	2,406	2,526	4,478	13,95	67,9	2,09	1220	1,038	1266
		B	61,4	61,5	61,5	61,5	1182,9	693,4	1185,2	491,8	2,405	2,398	2,526	4,778	14,22	66,4	1,94	1231	1,053	1296
		C	61,3	61,7	61,6	61,5	1181,1	695,1	1182,9	487,8	2,421	2,414	2,526	4,143	13,64	69,6	1,96	1223	1,053	1288
		Ort.									2,413	2,406		4,466	13,94	68,0	2,00			1283
4,5	4,3	A	61,3	61,2	61,4	61,3	1195,5	703,3	1196,0	492,7	2,426	2,419	2,509	3,272	13,88	76,4	1,77	1152	1,059	1220
		B	61,5	61,4	61,5	61,5	1184,7	698,5	1185,4	486,9	2,433	2,426	2,509	3,004	13,64	78,0	2,61	1119	1,053	1178
		C	61,3	61,6	61,5	61,5	1194,9	706,6	1195,6	489,0	2,444	2,436	2,509	2,589	13,27	80,5	1,89	1180	1,053	1243
		Ort.									2,434	2,427		2,955	13,59	78,3	2,09			1214
5	4,8	A	61,4	61,3	61,4	61,4	1195,9	708,6	1196,4	487,8	2,452	2,444	2,491	1,600	13,40	88,1	2,48	1184	1,056	1250
		B	61,6	61,6	61,4	61,5	1204,0	714,0	1204,3	490,3	2,456	2,448	2,491	1,438	13,25	89,1	2,13	1086	1,053	1144
		C	61,2	61,3	61,4	61,3	1194,1	707,8	1194,5	486,7	2,453	2,446	2,491	1,526	13,33	88,6	2,36	1029	1,059	1090
		Ort.									2,454	2,446		1,521	13,33	88,6	2,32			1161
5,5	5,2	A	61,1	61,0	61,1	61,1	1197,3	710,5	1196,3	485,8	2,465	2,457	2,475	0,414	13,35	96,9	2,5	1023	1,065	1089
		B	60,7	60,9	60,9	60,8	1196,1	710,6	1196,3	485,7	2,463	2,455	2,475	0,493	13,42	96,3	2,19	1095	1,074	1176
		C	61,1	61,2	61,3	61,2	1202,5	714,1	1202,9	488,8	2,460	2,453	2,475	0,595	13,51	95,6	3,28	1062	1,062	1128
		Ort.									2,462	2,455		0,501	13,43	96,3	2,66			1131



Şekil A.7 %9 Nano-CaCO₃ katkıli karışım için Marshall karışım tasarımı grafikleri

Tablo A.8 %0,1 Nano-organosilan katkıli karışım için Marshall karışım tasarımı verileri

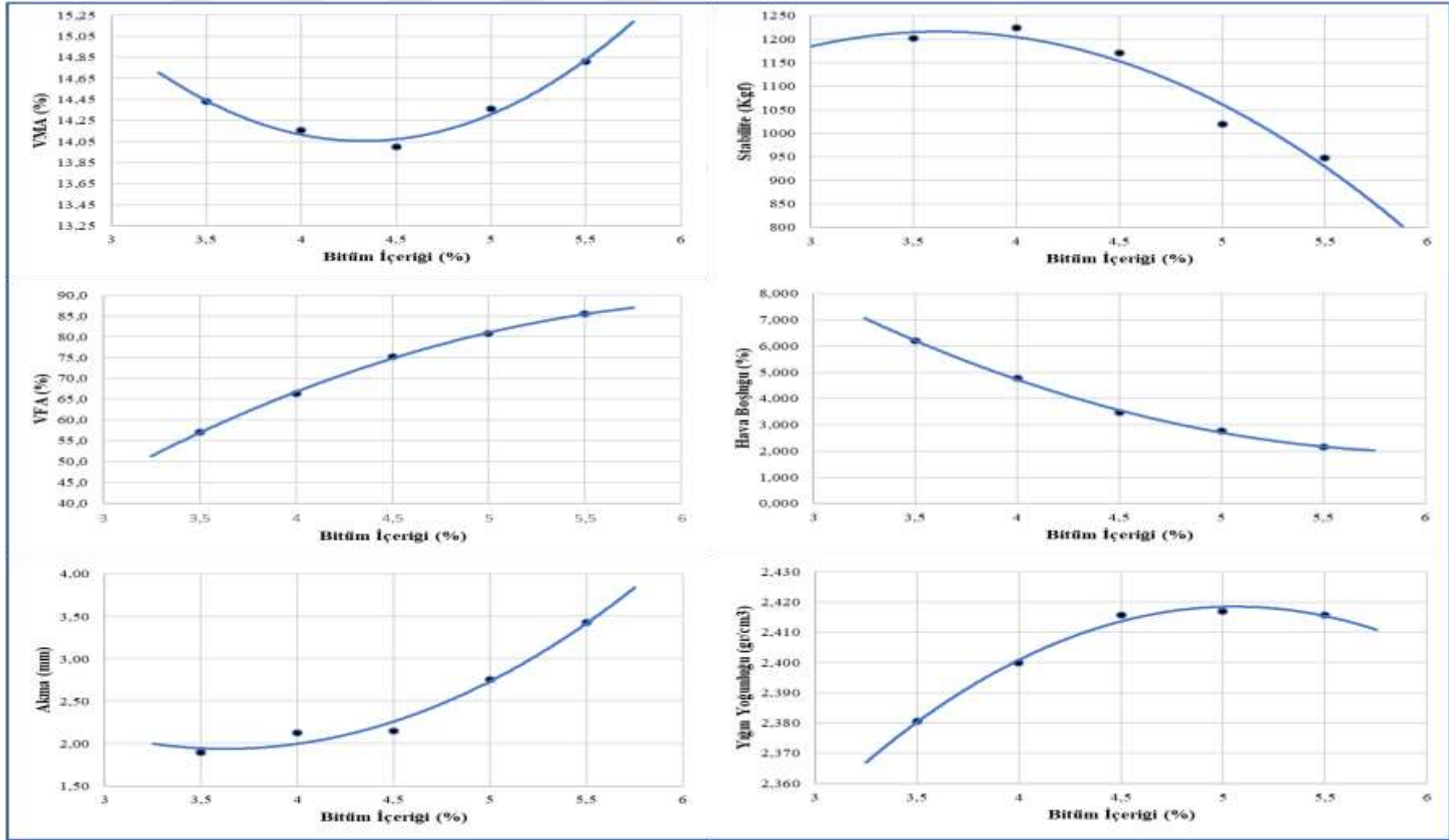
Bitüm %	Numune No.	Numune Yüksekliği (mm)				Havadaki Ağırlık (gr.)	Sudaki Ağırlık (gr.)	DYKA (gr.)	Numune Hacmi	Hacim Özg. Ağ.	Hacim Yoğunluğu	Maks. Teo. Özg. Ağ.	Hava Boşluğu	VMA	VFA	Akma	Marshall Stabilesitesi	Düzelme Faktörü	Düzeltilmiş Marshall Stabilesitesi	
		1	2	3	Ort.															W _h
3,5	3,4	A	62,2	62,3	62,2	62,2	1176,0	687,6	1180,7	493,1	2,385	2,378	2,550	6,483	14,53	55,4	2,35	1264	1,033	1306
		B	62,9	63,0	62,8	62,9	1174,2	687,7	1180,9	493,2	2,381	2,374	2,550	6,645	14,68	54,7	1,83	1007	1,015	1022
		C	62,9	63,0	63,0	63,0	1188,4	699,7	1197,5	497,8	2,387	2,380	2,550	6,389	14,45	55,8	2,02	1139	1,013	1154
		Ort.									2,384	2,377		6,506	14,55	55,3	2,07			1161
4	3,8	A	61,8	62,1	61,5	61,8	1183,0	694,3	1186,2	491,9	2,405	2,398	2,532	5,028	14,23	64,7	1,89	1275	1,043	1330
		B	62,3	62,3	62,2	62,3	1187,9	695,7	1189,8	494,1	2,404	2,397	2,532	5,059	14,25	64,5	2,25	1098	1,03	1131
		C	61,8	62,0	62,0	61,9	1188,5	697,0	1190,0	493,0	2,411	2,404	2,532	4,799	14,02	65,8	2,15	1171	1,04	1218
		Ort.									2,407	2,399		4,962	14,17	65,0	2,10			1226
4,5	4,3	A	60,9	61,3	61,3	61,2	1190,7	699,2	1191,0	491,8	2,421	2,414	2,515	3,723	14,06	73,5	2,18	1121	1,062	1191
		B	61,0	61,3	61,2	61,2	1187,9	697,5	1189,2	491,7	2,416	2,409	2,515	3,930	14,25	72,4	2,25	1079	1,062	1146
		C	61,4	61,0	61,0	61,1	1191,2	700,9	1192,5	491,6	2,423	2,416	2,515	3,643	13,99	74,0	3	1103	1,065	1175
		Ort.									2,420	2,413		3,765	14,10	73,3	2,48			1170
5	4,8	A	60,8	61,0	60,9	60,9	1198,3	706,1	1198,5	492,4	2,434	2,426	2,498	2,562	14,03	81,7	3,11	1070	1,071	1146
		B	61,1	60,9	60,3	60,8	1195,7	703,5	1196,0	492,5	2,428	2,421	2,498	2,793	14,24	80,4	2,87	998	1,074	1072
		C	60,9	61,1	61,2	61,1	1196,6	706,0	1196,9	490,9	2,438	2,430	2,498	2,403	13,89	82,7	2,41	1023	1,065	1089
		Ort.									2,433	2,426		2,586	14,05	81,6	2,80			1102
5,5	5,2	A	60,7	61,2	60,9	60,9	1196,9	705,5	1197,1	491,6	2,435	2,427	2,481	1,859	14,40	87,1	3,05	921	1,071	986
		B	60,8	60,9	61,3	61,0	1196,5	706,5	1196,6	490,1	2,441	2,434	2,481	1,592	14,17	88,8	2,97	967	1,068	1033
		C	61,5	61,5	61,2	61,4	1197,5	706,2	1197,8	491,6	2,436	2,429	2,481	1,810	14,36	87,4	3,04	888	1,056	938
		Ort.									2,437	2,430		1,754	14,31	87,7	3,02			986



Şekil A.8 %0,1 Nano-organosilan katkıli karışım için Marshall karışım tasarımı grafikleri

Tablo A.9 %0,2 Nano-organosilan katkıli karışım için Marshall karışım tasarımı verileri

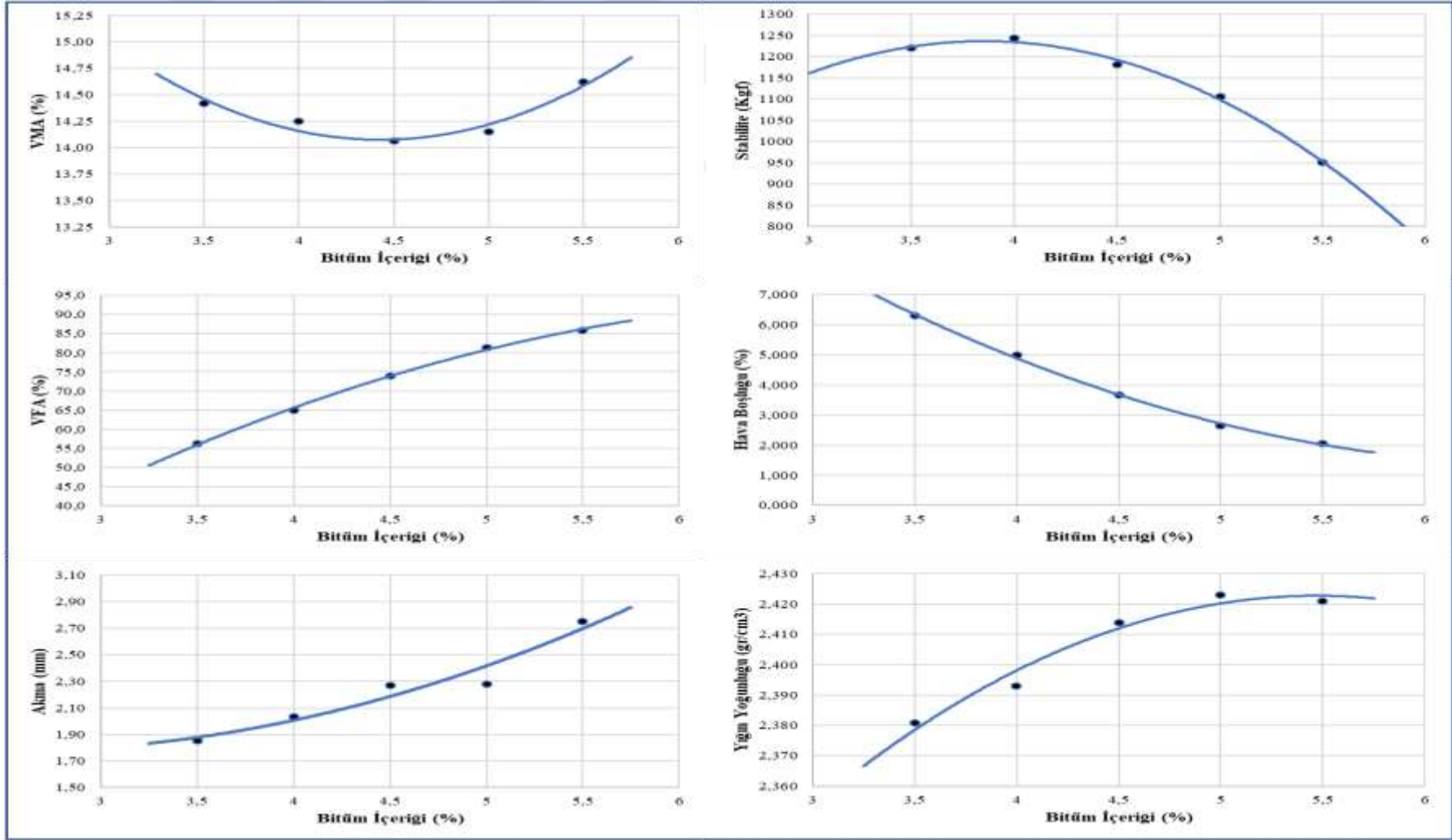
Bitüm %	Numune No.	Numune Yüksekliği (mm)				Havadaki Ağırlık (gr.)	Sudaki Ağırlık (gr.)	DYKA (gr.)	Numune Hacmi	Hacim Özg. Ağ.	Hacim Yoğunluğu	Maks. Teo. Özg. Ağ.	Hava Boşluğu	VMA	VFA	Akma	Marshall Stabilitesi	Düzelme Faktörü	Düzeltilmiş Marshall Stabilitesi	
		1	2	3	Ort.															W _h
3,5	3,4	A	62,6	62,8	62,7	62,7	1183,8	691,1	1187,4	496,3	2,385	2,378	2,545	6,293	14,52	56,7	1,89	1180	1,02	1204
		B	62,5	62,7	62,6	62,6	1185,1	693,8	1189,4	495,6	2,391	2,384	2,545	6,058	14,30	57,7	2,06	1171	1,023	1198
		C	62,3	62,3	62,3	62,3	1181,8	692,9	1188,1	495,2	2,387	2,379	2,545	6,244	14,47	56,9	1,74	1170	1,03	1205
		Ort.									2,388	2,381		6,198	14,43	57,1	1,90			1202
4	3,8	A	60,7	60,3	60,4	60,5	1189,2	695,4	1191,1	495,7	2,399	2,392	2,528	5,085	14,44	64,8	2,24	1152	1,056	1217
		B	61,3	61,3	61,3	61,3	1186,1	695,0	1187,0	492,0	2,411	2,404	2,528	4,620	14,02	67,0	2,09	1135	1,059	1202
		C	61,7	62,0	61,9	61,9	1190,5	697,6	1191,4	493,8	2,411	2,404	2,528	4,616	14,02	67,1	2,06	1205	1,04	1253
		Ort.									2,407	2,400		4,774	14,16	66,3	2,13			1224
4,5	4,3	A	61,0	60,6	61,0	60,9	1195,7	702,8	1196,0	493,2	2,424	2,417	2,510	3,415	13,95	75,5	1,83	1119	1,053	1178
		B	60,2	60,4	61,0	60,5	1194,9	702,3	1196,1	493,8	2,420	2,413	2,510	3,597	14,11	74,5	2,26	1078	1,046	1128
		C	61,0	60,8	61,1	61,0	1191,1	700,4	1191,7	491,3	2,424	2,417	2,510	3,415	13,95	75,5	2,35	1129	1,068	1206
		Ort.									2,423	2,416		3,476	14,00	75,2	2,15			1171
5	4,8	A	61,8	61,9	61,8	61,8	1197,0	703,7	1197,4	493,7	2,425	2,417	2,493	2,747	14,35	80,9	2,54	950	1,043	991
		B	61,4	61,5	62,1	61,7	1196,6	702,8	1197,1	494,3	2,421	2,414	2,493	2,898	14,48	80,0	2,61	994	1,046	1040
		C	61,1	61,8	61,6	61,5	1196,4	703,9	1196,8	492,9	2,427	2,420	2,493	2,638	14,26	81,5	3,11	976	1,053	1028
		Ort.									2,424	2,417		2,761	14,36	80,8	2,75			1019
5,5	5,2	A	61,5	61,5	61,3	61,4	1202,4	706,8	1202,7	495,9	2,425	2,417	2,476	2,087	14,75	85,9	3,53	939	1,056	992
		B	61,6	61,5	61,9	61,7	1199,3	704,3	1199,6	495,3	2,421	2,414	2,476	2,221	14,87	85,1	3,33	864	1,046	904
		C																		
		Ort.									2,423	2,416		2,154	14,81	85,5	3,43			948



Şekil A.9 %0,2 Nano-organosilan katkıli karışım için Marshall karışım tasarımı grafikleri

Tablo A.10 %0,3 Nano-organosilan katkılı karışım için Marshall karışım tasarımı verileri

Bitüm %		Numune No.	Numune Yüksekliği (mm)				Havadaki Ağırlık (gr.)	Sudaki Ağırlık (gr.)	DYKA (gr.)	Numune Hacmi	Hacim Özg. Ağ.	Hacim Yoğunluğu	Maks. Teo. Özg. Ağ.	Hava Boşluğu	VMA	VFA	Akma	Marshall Stabilesitesi	Düzelme Faktörü	Düzeltilmiş Marshall Stabilesitesi
			1	2	3	Ort.														
3,5	3,4	A	62,0	62,1	61,9	62,0	1180,7	689,9	1183,9	494,0	2,390	2,383	2,549	6,224	14,35	56,6	2,18	1211	1,038	1257
		B	62,4	62,0	62,4	62,3	1187,5	692,1	1189,5	497,4	2,387	2,380	2,549	6,329	14,44	56,2	1,89	1143	1,03	1177
		C	62,0	62,2	62,2	62,1	1190,1	695,4	1194,1	498,7	2,386	2,379	2,549	6,368	14,48	56,0	1,48	1167	1,053	1229
		Ort.										2,388	2,381		6,307	14,42	56,3	1,85		1221
4	3,8	A	61,1	61,2	61,2	61,2	1188,3	696,4	1189,2	492,8	2,411	2,404	2,531	4,720	14,00	66,3	1,95	1147	1,062	1218
		B	61,5	61,7	61,5	61,6	1186,6	693,3	1187,4	494,1	2,402	2,394	2,531	5,107	14,35	64,4	2,07	1171	1,046	1225
		C	61,4	61,1	61,4	61,3	1181,2	691,8	1183,9	492,1	2,400	2,393	2,531	5,155	14,39	64,2	2,08	1214	1,059	1286
		Ort.										2,404	2,397		4,994	14,25	65,0	2,03		1243
4,5	4,3	A	61,5	61,0	61,0	61,2	1182,9	693,9	1183,7	489,8	2,415	2,408	2,513	3,907	14,28	72,6	2,02	1141	1,062	1212
		B	60,9	60,7	60,0	60,5	1190,2	700,3	1190,8	490,5	2,427	2,419	2,513	3,452	13,87	75,1	2,31	1104	1,084	1197
		C	61,2	61,0	60,8	61,0	1190,7	699,4	1191,1	491,7	2,422	2,414	2,513	3,647	14,05	74,0	2,48	1063	1,068	1135
		Ort.										2,421	2,414		3,669	14,07	73,9	2,27		1181
5	4,8	A	61,0	61,4	61,1	61,2	1195,4	703,7	1196,0	492,3	2,428	2,421	2,496	2,722	14,22	80,9	2,33	1168	1,062	1240
		B	61,1	61,5	61,0	61,2	1201,5	709,3	1201,6	492,3	2,441	2,433	2,496	2,226	13,79	83,9	2,59	1058	1,062	1124
		C	61,4	61,5	61,5	61,5	1191,4	700,7	1192,6	491,9	2,422	2,415	2,496	2,969	14,44	79,4	1,91	904	1,053	952
		Ort.										2,430	2,423		2,639	14,15	81,4	2,28		1105
5,5	5,2	A	61,2	61,0	61,1	61,1	1196,5	704,5	1196,7	492,2	2,431	2,424	2,479	1,956	14,53	86,5	2,75	925	1,065	985
		B	61,2	61,2	61,5	61,3	1195,0	703,8	1195,3	491,5	2,431	2,424	2,479	1,939	14,52	86,6	3,11	881	1,059	933
		C	61,8	61,4	62,0	61,7	1198,5	704,1	1198,8	494,7	2,423	2,415	2,479	2,288	14,82	84,6	2,4	895	1,046	936
		Ort.										2,428	2,421		2,061	14,63	85,9	2,75		951



Şekil A.10 %0,3 Nano-organosilan katkıli karışım için Marshall karışım tasarımı grafikleri

EK 2
İNDİREKT ÇEKME MUKAVEMETİ (ITS) DENEYİ VE ÇEKME DAYANIM
ORANI (TSR %)



Tablo A.11 Kontrol ve nano-Bentonit katkılı karışımlar için indirekt çekme mukavemeti (ITS) ve çekme mukavemeti oranı (TSR) verileri

Karışım Tipi	Bitim (%)	Numune Durumu	Numune No.	Numune Yüksekliği (mm)				Numune Çapı mm	Havadaki Ağırlık (gr.) W _h	Sudaki Ağırlık (gr.) W _s	DYKA (gr.) W _{DYKA}	Numune Hacmi V	Hacim Özg. Ağ. G _{mb}	Hacim Yoğunluğu gr/cm ³	Maks. Teo. Özg. Ağ. G _{mm}	Hava Boşluğu V _h (%)	Hava boşlukların hacmi cm ³	Kısmi vakumdan sonraki DYKA ağırlığı B' (Kgf)	Absorbe edilmiş su j' (cm ³)	Doğruluk Derecesi S' (%)	Azami Yük Kgf	Azami Yük, P N	Çekme Mukavemeti kPa	Çekme Dayanımı Oranı TSR %
				1	2	3	Ort.																	
Kontrol Karışım	0%	Kuru	1	62,9	63,1	63,1	63,0	101,6	1191,5	681,5	1193	511,5	2,329	2,322	2,518	7,494					733	7188	714,9	68
			2	63,6	64	63,7	63,8	101,6	1187,6	683,9	1189	505,1	2,351	2,344	2,518	6,629					750	7355	723,1	
			3	62,9	62,8	62,7	62,8	101,6	1194,2	687,1	1195	507,9	2,351	2,344	2,518	6,628					760	7453	744,0	
		Ort.													6,917				Ort. 727,3					
		Şartlandırılmış	4	63,6	63,6	63,9	63,7	101,6	1187,8	678,1	1189	510,9	2,325	2,318	2,518	7,673	39,2	1214,4	26,6	68	519	5090	500,9	
			5	63,6	63,4	63,5	63,5	101,6	1194,9	690,8	1196,1	505,3	2,365	2,358	2,518	6,092	30,8	1214,7	19,8	64	503	4933	487,0	
6																								
Ort.													6,883				Ort. 493,9							
Nano-Bentonit Katkılı Karışım	%2	Kuru	1	62,3	62,9	62,5	62,6	101,6	1184,9	678,2	1186,4	508,2	2,332	2,325	2,513	7,228					701	6874	688,8	77
			2	62,6	62,7	62,6	62,6	101,6	1183,3	675,3	1185,1	509,8	2,321	2,314	2,513	7,644					612	6002	600,7	
			3																					
		Ort.													7,436				Ort. 644,8					
		Şartlandırılmış	4	62,7	62,8	62,9	62,8	101,6	1180,8	672,6	1182,7	510,1	2,315	2,308	2,513	7,879	40,3	1204,8	24	60	525	5148	514,0	
			5	62,5	62,6	62,6	62,6	101,6	1188,8	681,6	1190,1	508,5	2,338	2,331	2,513	6,963	35,5	1208,5	19,7	56	490	4805	481,5	
	6																							
	Ort.													7,421				Ort. 497,7						
	%4	Kuru	1	62,1	62,1	62,1	62,1	101,6	1185	684,8	1187,2	502,4	2,359	2,352	2,501	5,678					695	6816	688,1	79
			2	62	62,1	62,5	62,2	101,6	1188,5	690,3	1189,8	499,5	2,379	2,372	2,501	4,851					684	6708	676,1	
			3																					
		Ort.													5,264				Ort. 682,1					
Şartlandırılmış		4	62,6	62,7	62,4	62,6	101,6	1181	686,3	1183	496,7	2,378	2,371	2,501	4,918	24,4	1198,2	17,2	70	559	5482	549,3		
		5	62,6	62,7	62,4	62,6	101,6	1192,4	691,36	1193,3	501,94	2,376	2,368	2,501	5,002	25,1	1209,3	16,9	67	539	5286	529,6		
	6																							
Ort.													4,960				Ort. 539,5							
%6	Kuru	1	64,4	64,4	64,2	64,3	101,6	1185,8	657	1191,2	534,2	2,220	2,213	2,520	11,928					660	6472	630,7	74	
		2	63,5	63,6	63,9	63,7	101,6	1189,5	675,8	1193,2	517,4	2,299	2,292	2,520	8,785					711	6973	686,6		
		3	62,6	62,4	62,4	62,5	101,6	1187,9	678,7	1189,1	510,4	2,327	2,320	2,520	7,658					728	7139	716,5		
	Ort.													9,457				Ort. 677,9						
	Şartlandırılmış	4	61,8	61,9	62,2	62,0	101,6	1184,1	693,6	1186,3	492,7	2,403	2,396	2,520	4,647	22,9	1199,8	15,7	69	554	5433	549,6		
		5	62	62	62,1	62,0	101,6	1183,4	696,6	1186	489,4	2,418	2,411	2,520	4,061	19,9	1197,3	13,9	70	506	4962	501,5		
6		62	62,2	62	62,1	101,6	1182	694,5	1184	489,5	2,415	2,407	2,520	4,194	20,5	1198,7	16,7	81	458	4491	453,7			
Ort.													4,301				Ort. 501,6							

Tablo A.12 Nano-CaCO₃ katkılı karışımlar için indirekt çekme mukavemeti (ITS) ve çekme mukavemeti oranı (TSR) verileri

Karışım Tipi	Bitim (%)	Numune Durumu	Numune No.	Numune Yüksekliği (mm)				Numune Çapı mm	Havadaki Ağırlık (gr.) W _h	Sudaki Ağırlık (gr.) W _S	DYKA (gr.) W _{DYKA}	Numune Hacmi V	Hacim Özg. Ağ. G _{mb}	Hacim Yoğunluğu gr/cm ³	Maks. Teo. Özg. Ağ. G _{nm}	Hava Boşluğu V _h (%)	Hava boşlukların hacmi cm ³	Kısmi vakumdan sonraki DYKA ağırlığı B' (Kgf)	Absorbe edilmiş su j' (cm ³)	Doğruluk Derecesi S' (%)	Azami Yüklük Kgf	Azami Yüklük, P N	Çekme Mukavemeti kPa	Çekme Dayanımı Oranı TSR %		
				1	2	3	Ort.																			
				1	2	3	Ort.																			
Nano-CaCO ₃ Katkılı Karışım	%3	Kuru	1	64,3	64,5	64,4	64,4	101,6	1187,4	687,6	1193,5	505,9	2,347	2,340	2,509	6,439						724	7100	691,2	73	
			2	64,6	64,6	64,7	64,6	101,6	1182,2	685,3	1188,5	503,2	2,349	2,342	2,509	6,349							790	7747		751,4
			3																							
		Ort.														6,394								Ort. 721,3		
		Şartlandırılmış	4	64,6	64,7	64,6	64,6	101,6	1184,2	684,9	1190,8	505,9	2,341	2,334	2,509	6,691	33,8	1210,8	26,6	79		527	5168	501,3		
			5	64	64,2	63,9	64,0	101,6	1184,5	687,2	1189,9	502,7	2,356	2,349	2,509	6,073	30,5	1205	20,5	67		578	5668	554,9		
	6																									
	Ort.														6,382								Ort. 528,1			
	%6	Kuru	1	64,4	64,6	64,5	64,5	101,6	1186,8	687,2	1193	505,8	2,346	2,339	2,512	6,575						744	7296	709,2	76	
			2	64,8	64,7	64,9	64,8	101,6	1196	691,7	1201,8	510,1	2,345	2,338	2,512	6,645						816	8002	774,2		
			3	63,8	63,7	63,7	63,7	101,6	1186,1	689,6	1192	502,4	2,361	2,354	2,512	5,999						763	7482	736,0		
		Ort.														6,406							Ort. 739,8			
		Şartlandırılmış	4	64,4	64,7	64,7	64,6	101,6	1182,8	685,8	1189,9	504,1	2,346	2,339	2,512	6,576	33,2	1204,9	22,1	67		594	5825	565,3		
			5	64,2	64,2	64,3	64,2	101,6	1189,5	690,5	1194,5	504	2,360	2,353	2,512	6,028	30,4	1208,3	18,8	62		579	5678	554,2		
	6		64,5	64,4	64,6	64,5	101,6	1189,2	689,6	1194,6	505	2,355	2,348	2,512	6,238	31,5	1210,3	21,1	67		593	5815	565,2			
	Ort.														6,281							Ort. 561,6				
	%9	Kuru	1	64,6	64,8	64,7	64,7	101,6	1190	689,2	1197,7	508,5	2,340	2,333	2,505	6,594						758	7433	720,3	74	
			2	64,1	64,4	64,5	64,3	101,6	1177,8	684,5	1185,2	500,7	2,352	2,345	2,505	6,111						775	7600	740,6		
3			64,9	64,7	65	64,9	101,6	1187,7	689,1	1194,8	505,7	2,349	2,342	2,505	6,258						736	7218	697,6			
Ort.															6,321							Ort. 719,5				
Şartlandırılmış		4	64,4	64,6	64,3	64,4	101,6	1184	687	1191,9	504,9	2,345	2,338	2,505	6,402	32,3	1209,5	25,5	79		554	5433	528,6			
		5	65,1	65	65,4	65,2	101,6	1186,6	686,5	1194,7	508,2	2,335	2,328	2,505	6,805	34,6	1214,4	27,8	80		558	5472	526,4			
	6	64,1	64,4	64,3	64,3	101,6	1182,9	684,4	1188,8	504,4	2,345	2,338	2,505	6,396	32,3	1208,2	25,3	78		576	5649	551,0				
Ort.														6,534							Ort. 535,3					

Tablo A.13 Nano-organosilan katkılı karışımlar için indirekt çekme mukavemeti (ITS) ve çekme mukavemeti oranı (TSR) verileri

Karışım Tipi	Bitim (%)	Numune Durumu	Numune No.	Numune Yüksekliği (mm)				Numune Çapı mm	Havadaki Ağırlık (gr.) W _h	Sudaki Ağırlık (gr.) W _s	DYKA (gr.) W _{DYKA}	Numune Hacmi V	Hacim Özg. Ağ. G _{hb}	Hacim Yoğunluğu gr/cm ³	Maks. Teo. Özg. Ağ. G _{nm}	Hava Boşluğu V _h (%)	Hava boşlukların hacmi cm ³	Kısmi vakumdan sonraki DYKA ağırlığı B' (Kgf)	Absorbe edilmiş su j' (cm ³)	Doğruluk Derecesi S' (%)	Azami Yük Kgf	Azami Yük, P N	Çekme Mukavemeti kPa	Çekme Dayanımı Oranı TSR %																	
				1	2	3	Ort.																																		
Nano-organosilan Katkılı Karışım	%0,1	Kuru	1	62,6	63	62,5	62,7	101,6	1180,4	673	1181,7	508,7	2,320	2,313	2,519	7,880						577	5658	565,8	87																
			2	62,1	62,3	62,1	62,2	101,6	1183	678,2	1183,7	505,5	2,340	2,333	2,519	7,092							683	6698		675,4															
			3																																						
		Ort.																								7,486															Ort. 620,6
		Şartlandırılmış	4	62,6	62,5	62,8	62,6	101,6	1181,8	674,4	1182,9	508,5	2,324	2,317	2,519	7,734	39,3	1203,8	22	56	557	5462	546,7																		
			5	62,5	62,4	62,5	62,5	101,6	1183,4	676	1185,1	509,1	2,324	2,318	2,519	7,718	39,3	1205,6	22,2	56	543	5325	534,4																		
	6																																								
	Ort.																							7,726																Ort. 540,6	
	%0,2	Kuru	1	62,4	62,5	62,3	62,4	101,6	1181,8	679,5	1182,9	503,4	2,348	2,341	2,517	6,743						667	6541	657,2	87																
			2	62,4	62,7	62,5	62,5	101,6	1174,6	672,3	1176,7	504,4	2,329	2,322	2,517	7,495						618	6061	607,6																	
			3																																						
		Ort.																								7,119														Ort. 632,4	
		Şartlandırılmış	4	62,3	62,4	62,4	62,4	101,6	1171,6	669,2	1173,3	504,1	2,324	2,317	2,517	7,676	38,7	1194,4	22,8	59	620	6080	611,2																		
			5	62,6	62,8	62,8	62,7	101,6	1186,3	681	1187,5	506,5	2,342	2,335	2,517	6,961	35,3	1206,6	20,3	58	500	4903	490,0																		
	6																																								
	Ort.																							7,318																	Ort. 550,6
	%0,3	Kuru	1	63	63,2	63	63,1	101,6	1190,5	682	1191,5	509,5	2,337	2,330	2,518	7,221						658	6453	641,4	85																
			2	62	62,3	62,1	62,1	101,6	1178,6	679,4	1179,9	500,5	2,355	2,348	2,518	6,497						655	6423	648,1																	
3																																									
Ort.																								6,859																Ort. 644,8	
Şartlandırılmış		4	63,2	63,4	63,1	63,2	101,6	1187,1	680,6	1188,8	508,2	2,336	2,329	2,518	7,250	36,8	1208,5	21,4	58	551	5403	535,7																			
		5	62,6	62,7	62,6	62,6	101,6	1187,5	680,9	1188,3	507,4	2,340	2,333	2,518	7,072	35,9	1207,3	19,8	55	569	5580	558,5																			
	6																																								
Ort.																							7,161																	Ort. 547,1	