

T.C.
ERZİNCAN BİNALİ YILDIRIM ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**BITÜMLÜ SICAK KARIŞIMLARDA GRAFEN NANOPLATELET
KATKI MADDESİ PERFORMANSININ İNCELENMESİ**

Suna IŞIK

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Fatih İrfan BAŞ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

ERZİNCAN
2024

Her Hakkı Saklıdır.

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

BITÜMLÜ SICAK KARIŞIMLARDA GRAFEN NANOPLETELET KATKI MADDESİ PERFORMANSININ İNCELENMESİ

Suna IŞIK

Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Fatih İrfan BAŞ

Karayolu üstyapılarında en yaygın kullanılan kaplama türü, birçok avantajından dolayı bağlayıcı malzeme olarak bitümün kullanıldığı esnek kaplamadır. Güvenli, konforlu, ekonomik ve sürdürülebilir yollar için bitümlü sıcak karışım (BSK) kaplamalar sıklıkla tercih edilmektedir. Ancak trafik, iklim ve çevre etkilerinden dolayı BSK kaplamalarda farklı bozulmalar meydana gelmektedir. Bu bozulmalara karşı kaplamaların daha dayanıklı hale getirilebilmesi amacıyla bitüm farklı katkı maddeleri ile modifiye edilmektedir. Bu çalışmada sağlamlığı, esnekliği ve ekonomik olması nedeniyle katkı maddesi olarak Grafen nanoplatelet (GNP) kullanılmıştır. Taguchi yöntemi ile belirlenen deney planına göre %0,35;0,70;1 GNP oranları; 145, 160, 175, 190°C karıştırma sıcaklıkları; 15,30,45,60 dakika karıştırma süreleri; 1000, 2000, 3000, 4000 rpm karıştırma hızları olmak üzere dört parametre ve dörder seviye kullanılarak 16 farklı karışım hazırlanmıştır. Bu karışımlara penetrasyon, yumuşama noktası, parlama noktası, elastik geri dönme, dönel ince film ısıtma kaybı (RTFOT), Fourier dönüşümü kızılötesi spektroskopisi (FT-IR) ve Marshall tasarım deneyleri yapılarak belirlenen parametre ve seviyelerin bitüm üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Çalışma sonucunda, GNP katkı maddesi saf bitümün penetrasyonunu ve RTFOT kütle kaybını azaltmış; yumuşama noktasını, parlama noktasını, elastik geri dönme yüzdesini ve Marshall stabilitesini artırmıştır. Kullanılan 70/100 penetrasyonlu bitüm ile seçilen parametre ve seviyelerde yapılan çoklu yanıt performans indeksi (MRPI) optimizasyonu sonuçlarına göre optimum seviyeler %0,70 GNP oranı, 145°C karıştırma sıcaklığı, 15 dakika karıştırma süresi ve 2000 rpm karıştırma hızı olarak bulunmuştur. GNP, optimum karıştırma sıcaklığını 145°C'ye düşürerek enerji tasarrufu ve çevresel avantajlar sağlamıştır. Ayrıca bitümün sıcaklık hassasiyetini azaltarak yüksek sıcaklıklarda kalıcı deformasyon direncini, düşük sıcaklıklarda ise çatlama ve kırılma direncini artırmıştır.

2024, 177 Sayfa

Anahtar Kelimeler: Bitümlü sıcak karışım (BSK), Grafen Nanoplatelet (GNP), Marshall stabilite, Modifiye bitüm, Taguchi yöntemi

ABSTRACT

MSc Thesis

INVESTIGATION OF GRAPHENE NANOPATELET ADDITIVE PERFORMANCE IN HOT MIX ASPHALTS

Suna IŞIK

Erzincan Binali Yıldırım University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Fatih İrfan BAŞ

The most widely used type of pavement is flexible pavement, in which bitumen is used as a binding material due to its many advantages. Hot mix asphalt pavements (HMA) are often preferred for the safety, comfort, economy and sustainable roads expected from transportation. However, different deteriorations occur in HMA pavements due to traffic, climate, and environmental effects. Bitumen is modified with different additives to make the pavements more resistant to these deteriorations. In this study, graphene nanoplatelet (GNP) was used as an additive material due to its strength, flexibility, and cost-effectiveness. According to the experimental plan determined by the Taguchi method, 0; 0.35; 0.70; 1% GNP rates; 145, 160, 175, 190°C mixing temperatures; 15, 30, 45, 60 minutes mixing times; 1000, 2000, 3000, 4000 rpm mixing speeds, 16 different mixtures were prepared using four parameters and four levels each. Penetration, softening point, flash point, elastic recovery, rotational thin film heating loss (RTFOT), Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR), and Marshall design experiments were conducted on these mixtures, and the effects of the determined parameters and levels on bitumen were investigated. As a result of the study, the GNP additive reduced the penetration and RTFOT mass loss of pure bitumen; it increased the softening point, flash point, elastic recovery, and Marshall stability. According to the results of multiple response performance index (MRPI) optimizations performed at the selected parameters and levels with the 70/100 penetration bitumen used, the optimum levels were found to be 0.70% GNP rate, 145°C mixing temperature, 15 minutes mixing time, and 2000 rpm mixing speed. GNP provided energy-saving and environmental advantages by reducing the optimum mixing temperature to 145°C. It also increased the permanent deformation resistance at high temperatures and cracking and fracture resistance at low temperatures by reducing the temperature sensitivity of bitumen.

2024, 177 Pages

Keywords: Graphene Nanoplatelet (GNP), Hot mix asphalt (HMA), Marshall stability, Modified bitumen, Taguchi method

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın hazırlanması sürecinde ilgi, teşvik ve yardımlarıyla her zaman yanımda olan danışman hocam Sayın Fatih İrfan BAŞ'a gönülden teşekkür eder, saygılarımı sunarım.

Tez aşaması boyunca bilgi, tecrübe, hoşgörüsüyle kıymetli fikirlerini esirgemeyen ve laboratuvar imkânlarından faydalanmamı sağlayan Sayın Doç. Dr. O. Ünsal BAYRAK'a, Sayın Doç. Dr. H. Ferit BAYATA'ya ve Sayın Dr. Öğr. Üyesi Muhammed Ali ÇOLAK'a teşekkür ederim.

Laboratuvar çalışmalarındaki yardımlarından ötürü Arş. Gör. Ahmet Oğuz DEMİRİZ'e, Arş. Gör. Ömer Faruk KELEŞ'e, meslektaşlarım Mustafa ÇAKI ve Özge DEMİR'e teşekkür ederim.

Yüksek lisans çalışmalarımın her aşamasında, manevi destekleriyle beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan çok değerli arkadaşlarım Valide MENTEŞ'e ve Aytül TAŞTAN'a en içten duygularıyla teşekkür ederim.

Hayatım boyunca beni yüreklendiren annem Nezahat IŞIK'a, maddi ve manevi desteği ile her zaman arkamda duran babam Faruk IŞIK'a, kendisini örnek aldığım abim aynı zamanda meslektaşım İbrahim IŞIK'a, yol gösteren ablam Aynur ÖZDEMİR'e, her zaman destekçim olan eniştem Ali ÖZDEMİR'e, bana yol arkadaşlığı yapan kardeşim Çiğdem IŞIK'a, sevgili kardeşlerim ŞEVİN IŞIK'a ve Merve IŞIK'a sonsuz teşekkür ederim.

Son olarak, bu tez çalışmasındaki emeğimi bana enerji veren biricik yeğenim Sıdar ÖZDEMİR'e ithaf ediyorum.

Suna IŞIK

Haziran, 2024

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER	iv
ŞEKİLLER LİSTESİ	ix
TABLolar LİSTESİ.....	xiii
SİMGELER ve KISALTMALAR	xv
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ	6
2.1. Grafen Katkı Maddesinin Kullanıldığı Çalışmalar	6
2.2. Grafen Oksit (GO) Katkı Maddesinin Kullanıldığı Çalışmalar	10
2.3. Grafen Nanoplatelet (GNP) Katkı Maddesinin Kullanıldığı Çalışmalar	13
3. KURAMSAL TEMELLER.....	18
3.1. Karayolu	18
3.1.1. Karayolu altyapısı	18
3.1.2. Karayolu üstyapısı.....	18
3.1.2.1. Rijit üstyapılar.....	19
3.1.2.2. Kompozit (yarı rijit) üstyapılar	20
3.1.2.3. Esnek üstyapılar	21
3.2. Esnek Üstyapı.....	22
3.2.1. Esnek üstyapı tabakaları	23
3.2.2. Esnek üstyapı avantaj ve dezavantajları	24
3.3. Bitümlü Bağlayıcılar	25
3.3.1. Bitümlü bağlayıcılara uygulanan deneyler.....	26
3.3.2. Bitümlü bağlayıcıların üretim sıcaklığına göre uygulamaları.....	27
3.4. Bitümlü Sıcak Karışımlar (BSK)	28
3.4.1. Bitümlü sıcak karışımların özellikleri	28
3.4.1.1. Stabilite	28
3.4.1.2. Durabilite (dayanıklılık).....	29

3.4.1.3. Rijitlik	29
3.4.1.4. Esneklik.....	29
3.4.1.5. İşlenebilirlik	30
3.4.1.6. Geçirimsizlik.....	30
3.4.1.7. Yorulma mukavemeti.....	31
3.4.1.8. Kayma mukavemeti	31
3.5. BSK Uygulamalı Esnek Kaplamalarda Meydana Gelen Bozulmalar	32
3.5.1. Deformasyonlar	32
3.5.1.1. Üniform olmayan (düzensiz) yüzey bozuklukları.....	33
3.5.1.2. Tekerlek izi.....	33
3.5.1.3. Lastik deseni.....	34
3.5.1.4. Bölgesel çökme (oturmalar).....	35
3.5.1.5. Ondülasyonlar (dalgalanmalar).....	36
3.5.1.6. Yığılmalar	36
3.5.1.7. Kabarmalar.....	37
3.5.2. Çatlamalar	37
3.5.2.1. Stabilite çatlakları.....	38
3.5.2.2. Yorulma çatlakları.....	38
3.5.2.3. Yansıma çatlakları.....	39
3.5.2.4. Timsah sırtı çatlaklar.....	39
3.5.2.5. Düşük sıcaklık (büzülme) çatlakları.....	40
3.5.2.6. Kenar çatlakları	40
3.5.2.7. Derz çatlakları	41
3.5.2.8. Enine çatlaklar.....	41
3.5.2.9. Yüzey kayması (öteleme) çatlakları.....	42
3.5.3. Ayırışmalar	43
3.5.3.1. Folluk tipi oyuklar.....	43

3.5.3.2. Sökülmeler	44
3.5.3.3. Tabaka halinde sökülmeler	45
3.5.3.4. Soyulma	45
3.5.3.5. Kayganlık	45
3.5.3.6. Cilalanma	46
3.5.3.7. Kusma (terleme).....	46
3.6. Bitümlü Sıcak Karışımlarda Adezyon, Kohezyon ve Yaşlanma	47
3.7. Bitümlü Sıcak Karışım Yapımında Kullanılan Malzemeler	49
3.7.1. Agrega ve filler.....	49
3.7.1.1. Agregaların fiziksel özellikleri.....	50
3.7.1.2. Agregalara uygulanan deneyler.....	53
3.7.2. Bitüm.....	54
3.7.2.1. Bitümün elde edilmesi ve özellikleri.....	54
3.7.2.2. Bitümün kimyasal yapısı.....	55
3.7.2.3. Bitümün davranışı	56
3.7.2.4. Bitümün fiziksel özelliklerinin belirlenmesi için uygulanan deneyler	58
3.7.3. Katkı maddeleri	59
3.7.3.1. Katkı maddelerinin sahip olmaları gereken özellikler	59
3.7.3.2. Katkı maddelerinin kullanılma sebepleri	60
3.7.3.3. Çalışmada kullanılan katkı maddesi (grafen ve türevleri)	60
3.7.3.4. Grafen.....	61
3.7.3.5. Grafen Oksit (GO).....	64
3.7.3.6. Grafen Nanoplatelet (GNP).....	64
3.7.3.7. Grafen ve türevlerinin bitüm üzerindeki etkileri.....	66
3.8. Bitümün Modifiye Edilmesi	67
4. MATERYAL ve YÖNTEM.....	68
4.1. Materyal.....	68
4.1.1. Bitüm.....	68

4.1.1.1. Bitüm özgül ağırlık deneyi.....	68
4.1.1.2. Kullanılan saf bitüm özellikleri.....	71
4.1.2. Agregası ve filler.....	72
4.1.2.1. Kaba agregası özgül ağırlık deneyi.....	72
4.1.2.2. İnce agregası özgül ağırlık deneyi	75
4.1.2.3. Filler özgül ağırlık deneyi	79
4.1.2.4. Kullanılan agregası ve fillerin fiziksel özellikleri.....	83
4.1.2.5. Gradasyon	83
4.1.3. Grafen Nanoplatelet (GNP).....	85
4.2. Yöntem	86
4.2.1. Bitüm modifikasyonu.....	86
4.2.2. Modifiye bitümün karıştırılması	88
4.2.3. Saf bitüm ve modifiye bitümlere uygulanan deneyler ve yöntemler	89
4.2.3.1. Penetrasyon deneyi.....	91
4.2.3.2. Yumuşama noktası deneyi	93
4.2.3.3. Penetrasyon indeksi.....	95
4.2.3.4. Parlama noktası deneyi	95
4.2.3.5. Elastik geri dönme deneyi.....	97
4.2.3.6. Dönel ince film ısıtma kaybı (RTFOT) deneyi	98
4.2.3.7. Marshall tasarımı deneyi	101
4.2.3.8. Fourier dönüşümü kızılötesi spektroskopisi (FT-IR) deneyi	113
4.2.3.9. Taguchi metodu.....	114
5. ARAŞTIRMA BULGULARI	117
5.1. Saf Bitüm Deney Sonuçları.....	117
5.2. RTFOT Öncesi Penetrasyon Deney Sonuçları.....	117
5.3. RTFOT Sonrası Penetrasyon Deney Sonuçları.....	121
5.4. RTFOT Öncesi Yumuşama Noktası Deney Sonuçları.....	125
5.5. RTFOT Sonrası Yumuşama Noktası Deney Sonuçları.....	128

5.6. Penetrasyon İndeksi.....	132
5.7. Parlama Noktası Deney Sonuçları.....	133
5.8. Elastik Geri Dönme Deney Sonuçları	137
5.9. Dönel İnce Film Isıtma Kaybı (RTFOT) Deney Sonuçları.....	140
5.10. Marshall Tasarım Deney Sonuçları	142
5.11. Fourier Dönüşümü Kızılötesi Spektroskopisi (FT-IR) Deney Sonuçları	152
5.12. Çoklu Yanıt Performans İndeksi (MRPI) ile Optimizasyon.....	155
6. SONUÇLAR.....	163
KAYNAKLAR	168



ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 3.1. Karayolu üst yapı tabakaları ve türleri.....	19
Şekil 3.2. Rijit kaplama tabakaları.....	20
Şekil 3.3. Rijit kaplamada yük dağılımı (Yeğinobalı, 2009)	20
Şekil 3.4. Esnek kaplama tabakaları	21
Şekil 3.5. Esnek kaplamada yük dağılımı (Yeğinobalı, 2009)	22
Şekil 3.6. Esnek üstyapı tipik tabakaları.....	22
Şekil 3.7. Bitümlü bağlayıcıların sınıflandırılması (Yüknü vd., 2021)	26
Şekil 3.8. Bitümlü bağlayıcıların üretim sıcaklık sınıflandırması (ASMÜD, 2024)	27
Şekil 3.9. Esnek kaplamada oluşan üniform olmayan yüzey bozukluğu.....	33
Şekil 3.10. Esnek kaplamada oluşan tekerlek izi deformasyonu	34
Şekil 3.11. Esnek kaplamada oluşan lastik deseni	35
Şekil 3.12. Esnek kaplamada oluşan bölgesel çökme.....	35
Şekil 3.13. Esnek kaplamada oluşan dalgalanmalar	36
Şekil 3.14. Esnek kaplamada oluşan yığılmalar	36
Şekil 3.15. Esnek kaplamada oluşan kabarmalar.....	37
Şekil 3.16. Esnek kaplamada oluşan stabilite çatlakları	38
Şekil 3.17. Esnek kaplamada oluşan yorulma çatlakları.....	38
Şekil 3.18. Esnek kaplamada oluşan yansıma çatlakları.....	39
Şekil 3.19. Esnek kaplamada oluşan timsah sırt çatlaklar	39
Şekil 3.20. Esnek kaplamada oluşan düşük sıcaklık çatlakları.....	40
Şekil 3.21. Esnek kaplamada oluşan kenar çatlakları	41
Şekil 3.22. Esnek kaplamada oluşan derz çatlakları	41
Şekil 3.23. Esnek kaplamada oluşan enine çatlaklar	42
Şekil 3.24. Esnek kaplama oluşan yüzey kayması çatlakları.....	42
Şekil 3.25. Esnek kaplamada oluşan folluk tipi oyuklar.....	44
Şekil 3.26. Esnek kaplamada oluşan sökülmeler	44
Şekil 3.27. Esnek kaplamada oluşan soyulma	45
Şekil 3.28. Esnek kaplamada oluşan cilalanma	46
Şekil 3.29. Esnek kaplamada oluşan kasma	46

Şekil 3.30. Bitümün zaman içerisinde yaşlanması (Lav ve Lav, 2004).....	48
Şekil 3.31. Yol yapımında kullanılan agregalar (Çetin, 2007)	49
Şekil 3.32. Agregaların biçim sınıflandırılması.....	51
Şekil 3.33. Agregaların üç boyutlu dane biçimi sınıflandırılması	51
Şekil 3.34. Agregaların gözeneklilik sınıflandırılması	51
Şekil 3.35. Agregaların yüzey yapısı sınıflandırılması.....	52
Şekil 3.36. Agregaların porozite sınıflandırılması.....	52
Şekil 3.37. Petrolün damıtılması ve bitümün elde edilmesi (Lav ve Lav, 2004).....	55
Şekil 3.38. Bitümün statik yükler karşısındaki davranışı (Read ve Whiteoak, 2003)	57
Şekil 3.39. Bitümün dinamik yükler karşısındaki davranışı	58
Şekil 3.40. Grafen'in yapısı (Adlı, 2019)	62
Şekil 3.41. Grafen nanoplatelet.....	65
Şekil 4.1. Cam piknometreler ve boş piknometrenin tartımı	68
Şekil 4.2. Su dolu piknometrenin tartımı	69
Şekil 4.3. Bitüm doldurulmuş piknometreler ve bitüm dolu piknometrenin tartımı	69
Şekil 4.4. Bitüm ve su doldurulmuş piknometreler ve su banyosunda bekletilmesi	70
Şekil 4.5. Bitüm ve su doldurulmuş piknometrelerin su banyosundan sonra tartılması.	70
Şekil 4.6. Çalışmada kullanılan agregalar.....	72
Şekil 4.7. Tartılan 2 kg kaba agrega ve 2 adet deney numunesi.....	73
Şekil 4.8. Agregaların yıkanması ve 24 saat su içinde bekletilmesi.....	73
Şekil 4.9. Agregaların kurutulması ve suya doymuş yüzey kuru hali	73
Şekil 4.10. Agregaların sudaki ağırlığının tartılması	74
Şekil 4.11. Agregaların etüvde kurutulması ve kurutulmuş agregaların tartımı.....	74
Şekil 4.12. Gradasyona uygun tartılan 2 tane 1 kg'lık ince agrega numuneleri	76
Şekil 4.13. Agregaların üstüne su eklenmesi ve 24 saat su içinde bekletilmesi	76
Şekil 4.14. Agregaların sıcak hava kaynağı ile kurutulması ve koni metodu.....	77
Şekil 4.15. Su dolu piknometrenin tartımı ve ince agrega dolu piknometrenin tartımı..	77
Şekil 4.16. Su ve ince agrega dolu piknometrenin tartımı	78
Şekil 4.17. İnce agreganın etüvde kurutulması ve kurumuş agreganın tartılması	78
Şekil 4.18. Tartılan 100 gram filler ve 2 adet filler deney numunesi	80
Şekil 4.19. Cam piknometreler ve boş piknometrelerin tartımı.....	80
Şekil 4.20. Su dolu piknometre tartımı	80

Şekil 4.21. Filler dolu piknometre tartımı.....	81
Şekil 4.22. Filler ve su dolu piknometreler ve tartımı	81
Şekil 4.23. Numunelerin tepsiye boşaltılması ve etüvde kurutulması	82
Şekil 4.24. Etüvde kurumuş filler numuneleri ve kurumuş filler numunesinin tartımı ..	82
Şekil 4.25. Agregaların elek analizi ve gradasyona uygun elenmiş agregalar.....	83
Şekil 4.26. Karışımın gradasyon eğrisi	84
Şekil 4.27. Grafen nanoplateletler katkı maddesi ve dıştan görünümü	85
Şekil 4.28. High Shear Mixer	86
Şekil 4.29. Karışıma uygun miktarda bitüm ve ağırlığınca GNP'nin tartılması.....	88
Şekil 4.30. GNP'nin mikserde bitüme eklenmesi ve cam çubuk ile karıştırılması.....	89
Şekil 4.31. Hazırlanmış GNP katkılı modifiye bitümler.....	89
Şekil 4.32. Saf ve modifiye bitümlere uygulanan deneylerin akış şeması.....	90
Şekil 4.33. Kapalı ve açık durumdaki penetrasyon deney cihazı	91
Şekil 4.34. Penetrasyon deney numunesi ve numunenin su banyosunda bekletilmesi...	92
Şekil 4.35. Penetrasyon değerlerinin okunması.....	92
Şekil 4.36. Yumuşama noktası deney numunesi ve numunenin cihaza yerleştirilmesi .	94
Şekil 4.37. Yumuşama noktası deneyinin başlaması ve bitüm kaplı bilyelerin düşmesi	94
Şekil 4.38. Parlama noktası deney cihazı ve deney kabı	96
Şekil 4.39. Parlama noktası deneyinin yapılışı ve bitümün parlama anı	96
Şekil 4.40. Elastik geri dönme deney cihazı	97
Şekil 4.41. Elastik geri dönme deney numuneleri	97
Şekil 4.42. Elastik geri dönme numunelerinin çekilmesi, kesilmesi ve geri dönmesi....	98
Şekil 4.43. RTFOT deney cihazı ve deney cihazının içi	99
Şekil 4.44. Boş ve 35 gram bitüm konulmuş RTFOT deney şişeleri	99
Şekil 4.45. 35 gram bitüm konulmuş RTFOT deney şişelerinin cihaza yerleştirilmesi	100
Şekil 4.46. RTFOT sonrası kütle kaybı hesabı için soğumaya bırakılan numuneler....	100
Şekil 4.47. Marshall deney malzemeleri ve gradasyona uygun 1150 g agrega	102
Şekil 4.48. 160°C sıcaklıktaki etüv ve Marshall deney malzemelerinin ısıtılması.....	103
Şekil 4.49. Karıştırma için kullanılan mikser ve Marshall deney kalıpları	103
Şekil 4.50. Tokmak cihazı ve tokmak cihazının içine numune yerleştirilmesi	104
Şekil 4.51. Marshall kalıbı içindeki briket ve briketlerin soğumaya bırakılması	104
Şekil 4.52. Briketlerin kriko ile kalıptan çıkarılması ve kalıptan çıkarılmış briketler..	105

Şekil 4.53. Briketlerin yüksekliklerinin kumpas ile ölçülmesi	105
Şekil 4.54. Briketin havadaki ve sudaki ağırlıklarının tartılması	106
Şekil 4.55. 60°C sıcaklıktaki su banyosu ve briketlerin su banyosunda bekletilmesi ..	107
Şekil 4.56. Marshall test cihazı ve brikete yük uygulanması.....	108
Şekil 4.57. 21 adet Marshall deney numunesi	110
Şekil 4.58. 16 farklı karışımla hazırlanan 48 adet Marshall deney numunesi	110
Şekil 4.59. Taguchi yöntemi ile belirlenen optimum Marshall numuneleri	111
Şekil 4.60. Toplamda yapılan 75 adet Marshall numunesi.....	111
Şekil 4.61. FT-IR deney cihazı	113
Şekil 5.1. RTFOT öncesi penetrasyonun tüm seviyeler için performans istatistikleri .	120
Şekil 5.2. RTFOT sonrası penetrasyonun tüm seviyeler için performans istatistikleri	124
Şekil 5.4. RTFOT sonrası yumuşama noktası tüm seviyeler için performans istatistikleri	131
Şekil 5.5. Saf bitüm ve 16 karışımın penetrasyon indekslerinin karşılaştırması	133
Şekil 5.6. Parlama noktası tüm seviyeler için performans istatistikleri.....	136
Şekil 5.7. Elastik geri dönme tüm seviyeler için performans istatistikleri	139
Şekil 5.8. Dp – Bitüm oranı	144
Şekil 5.9. Stabilitate – Bitüm oranı.....	144
Şekil 5.10. Akma – Bitüm oranı	145
Şekil 5.11. VFA – Bitüm oranı	145
Şekil 5.12. Boşluk oranı – Bitüm oranı	146
Şekil 5.13. VMA – Bitüm oranı.....	146
Şekil 5.14. Saf bitüm FT-IR deney sonucu.....	152
Şekil 5.15. Deney 4 modifiye bitüm FT-IR deney sonucu	153
Şekil 5.16. Deney 6 modifiye bitüm FT-IR deney sonucu	153
Şekil 5.17. Deney 13 modifiye bitüm FT-IR deney sonucu	154
Şekil 5.18. Deney 16 modifiye bitüm FT-IR deney sonucu	154
Şekil 5.19. MRPI performans istatistikleri	159
Şekil 5.20. %95 güven aralığında yapılmış tahmin dağılım grafiği	161

TABLÖLAR LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 3.1. Grafen ve türevlerinin bitüm üzerindeki etkileri.....	66
Tablo 4.1. B 70/100 penetrasyonlu saf bitüm özellikleri	71
Tablo 4.2. Agregâ ve fillerin fiziksel özellikleri	83
Tablo 4.3. Kullanılan agregâ gradasyonunun elek analizi	84
Tablo 4.4. Grafen nanoplateletlerin özellikleri.....	85
Tablo 4.5. Deney parametreleri ve seviyeleri.....	87
Tablo 4.6. Deney planı	87
Tablo 4.7. Penetrasyon değerleri arasında olabilecek en büyük farklar.....	93
Tablo 4.8. Marshall tasarım deney kriterleri	109
Tablo 4.9. Optimum bitüm %'si için kullanılan formüller tablosu	112
Tablo 4.10. Deney parametreleri ve seviyeleri.....	115
Tablo 4.11. Taguchi metodu ile oluşturulan deney planı	116
Tablo 5.1. Saf bitüm deney sonuçları.....	117
Tablo 5.2. RTFOT öncesi penetrasyon değerleri ve S/N değerleri	118
Tablo 5.3. RTFOT öncesi penetrasyon ortalama S/N etkileri.....	118
Tablo 5.4. RTFOT öncesi penetrasyon performans tahminleri.....	119
Tablo 5.5. RTFOT öncesi penetrasyon ANOVA tablosu	121
Tablo 5.6. RTFOT sonrası penetrasyon değerleri ve S/N değerleri.....	122
Tablo 5.7. RTFOT sonrası penetrasyon ortalama S/N etkileri.....	122
Tablo 5.8. RTFOT sonrası penetrasyon performans tahminleri.....	123
Tablo 5.9. RTFOT sonrası penetrasyon ANOVA tablosu	124
Tablo 5.10. RTFOT öncesi yumuşama noktası değerleri ve S/N değerleri.....	125
Tablo 5.11. RTFOT öncesi yumuşama noktası ortalama S/N etkileri	126
Tablo 5.12. RTFOT öncesi yumuşama noktası performans tahminleri	126
Tablo 5.13. RTFOT öncesi yumuşama noktası ANOVA tablosu	128
Tablo 5.14. RTFOT sonrası yumuşama noktası değerleri ve S/N değerleri	129
Tablo 5.15. RTFOT sonrası yumuşama noktası ortalama S/N etkileri	129
Tablo 5.16. RTFOT sonrası yumuşama noktası performans tahminleri	130
Tablo 5.17. RTFOT sonrası yumuşama noktası ANOVA tablosu.....	131

Tablo 5.18. RTFOT öncesi ve sonrası penetrasyon indeksi sonuçları	132
Tablo 5.19. Parlama noktası deneyi değerleri ve S/N değerleri	134
Tablo 5.20. Parlama noktası için ortalama S/N etkileri.....	134
Tablo 5.21. Parlama noktası performans tahminleri	135
Tablo 5.22. Parlama noktası değerleri için ANOVA tablosu.....	136
Tablo 5.23. Elastik geri dönme deney değerleri ve S/N değerleri.....	137
Tablo 5.24. Elastik geri dönme yüzdesi ortalama S/N etkileri.....	138
Tablo 5.25. Elastik geri dönme yüzdesi performans tahminleri.....	138
Tablo 5.26. Elastik geri dönme yüzdesi için ANOVA tablosu	139
Tablo 5.27. RTFOT kütle kaybı değerleri ve S/N değerleri.....	140
Tablo 5.28. RTFOT ortalama S/N etkileri.....	141
Tablo 5.29. RTFOT kütle kaybı performans tahminleri.....	141
Tablo 5.30. RTFOT kütle kaybı için ANOVA tablosu	142
Tablo 5.31. Optimum bitüm oranı için Marshall tasarım deney sonuçları.....	143
Tablo 5.32. Optimum bitüm yüzdesi ile Marshall tasarım deney sonuçları.....	147
Tablo 5.33. Marshall stabilite değerleri ve S/N değerleri	149
Tablo 5.34. Marshall stabilite ortalama S/N etkileri	150
Tablo 5.35. Marshall stabilite performans tahminleri	150
Tablo 5.36. Marshall stabilite ANOVA tablosu.....	151
Tablo 5.37. MRPI değerleri ve S/N değerleri	157
Tablo 5.38. MRPI ortalama S/N etkileri	158
Tablo 5.39. MRPI performans tahminleri	158
Tablo 5.40. MRPI performans istatistikleri ve doğrulama deney sonuçları.....	159

SİMGELER ve KISALTMALAR

Simgeler

%	Yüzde
°C	Santigrat Derece
cm	Santimetre
cm ⁻¹	Dalga Sayısı Birimi
g	Gram
kg	Kilogram
m	Metre
mm	Milimetre
nm	Nanometre
rpm	Dakikadaki Devir Sayısı

Kısaltmalar

BSK	Sıcak Karışım Asfalt
GMAB	Grafen Modifiyeli Asfalt Bağlayıcılar
GNP	Grafen Nanoplatelet
GO	Grafen Oksit
FT-IR	Fourier Dönüşümü Kızılötesi Spektroskopisi
KGM	Karayolları Genel Müdürlüğü
MRPI	Ağırlıklar ve Çoklu Yanıt Performans İndeksleri
MQ	Marshall Katsayısı
PI	Penetrasyon İndeksi
RTFOT	Dönel İnce Film Isıtma Kaybı Deneyi
S/N	Taguchi Yöntemi Performans İstatistiği
VFA	Bitüm ile Dolu Boşluk (%)
VMA	Agregalar Arasındaki Boşluk (%)
VTM	Toplam Karışımın Boşluk Oranı

1. GİRİŞ

Dünya nüfusu hızla artmaktadır; 1999 yılı verilerine göre 6 milyarken 2022 yılı verilerine göre 8 milyara yükselmiştir (TÜİK, 2023). Birleşmiş Milletler bu verilere dayanarak 2050 yılında dünya nüfusunun 11 milyara yükseleceğini tahmin etmektedir (Wilmoth vd., 2021). Nüfusun artması ile insanların ulaşım gereksinimleri dolayısı ile motorlu taşıt sayısı artmaktadır. 2022 yılı verilerine göre ülkemizde 26.482.847 adet motorlu kara taşıt sayısı mevcuttur. Yollardaki trafik yoğunluğu (taşıt/km) 2003-2022 yıllarında yaklaşık 2,7 kat artmıştır (KGM, 2024). Bu yüzden sürdürülebilir ve ekonomik kara yollara ihtiyaç giderek artmaktadır.

Karayolu üstyapısı, trafik yüklerinin zemine güvenli bir şekilde aktarılabilmesi için tasarlanan katmanlı bir sistemdir. Karayolunda kullanılan kaplama çeşitleri, kullanıldıkları bağlayıcı malzeme ve gösterdikleri davranışlara göre ele alındıklarında esnek üstyapı, rijit üstyapı ve kompozit üstyapı olacak şekilde üç gruba ayrılmaktadır. Esnek üstyapıda bağlayıcılık sağlayan malzeme asfalt çimentosu (bitüm), rijit üstyapıda portland çimento (beton), kompozit üstyapıda ise beton ve asfaltın birlikte kullanılmasıdır. Katmanlı sistem, sıkıştırılmış taban zemininden yukarıya doğru sırasıyla; esnek üstyapılarda: alt temel tabaka, temel ve bitümlü kaplama; rijit üstyapılarda: alt temel ve beton kaplama; kompozit üstyapılarda ise kırmataş temel, silindirle sıkıştırılmış beton ve asfalt tabakalardan oluşmaktadır (Abut, 2019; Araz vd., 2023; Orhan ve Bahadır, 2023).

Günümüzde, dünya genelinde en yaygın kullanılan üstyapı çeşidi esnek üstyapıdır. Amerika'daki yolların yaklaşık %94'ü, Avrupa'daki yolların yaklaşık %95'i ve ülkemizdeki yolların %90' dan fazlası esnek üstyapılardan oluşmaktadır (Huang vd., 2022; Araz vd., 2023; Şimşek, 2024). 2024 yılı Türkiye Karayolu Genel Müdürlüğü (KGM) verilerine göre otoyol, devlet yolları ve il yolları olacak şekilde KGM sorumluluğundaki toplam 68.654 km yolun 29.879 km'si yani %43,5 asfalt kaplama yollardır (KGM, 2024).

Esnek üstyapıların, rijit üstyapılara göre birçok avantajı olduğundan dolayı esnek kaplamaların performansını artırmaya yönelik çalışmalar günden güne hızla artmaktadır.

Esnek kaplamalı yolların, rijit kaplamalı yollara göre en büyük avantajı geri dönüştürülebilir olmasıdır. Ayrıca esnek üstyapıların bakım-onarım süresi rijit üstyapılara kıyasla daha kısadır ve daha kolaydır. Buna bağlı olarak yolun trafiğe kapanma süresi de çok azdır. Esnek kaplamalı yollar ilk yapıldığında daha az maliyetle yapılır, fakat rijit üstyapılara göre bakım-onarım maliyeti fazladır (Nazki vd., 2020; Araz vd., 2023). Bu dezavantaj, çeşitli katkı maddelerinin kullanımı ile daha stabil yolların tasarımı sonucu bakım-onarım ihtiyacının azalması dolayısıyla bakım-onarım maliyetinin minimum seviyeye indirilmesi ile çözüm bulabilmektedir.

Ülkemizde 2024 yılı ulaştırma bütçesi 147.834.332.000 TL'dir. Bu bütçenin 11.450.747.000 TL'si yani %7,746'sı bakım-onarım hizmetleri için ayrılmıştır. Bakım-onarım hizmetleri içerisinde bitüm kaplamalı yollar için ayrılan bütçe 10.551.000.000 TL'dir yani bakım-onarım bütçesinin %92,142'sidir (KGM, 2024). Bitümün, ekonomik ve uygun katkı ile modifiye edilerek stabilitesi yüksek yollar tasarlanması sonucunda, kaplamanın bakım-onarım ihtiyacı azaltılabilmektedir.

Günümüz şartlarında, ulaşımdan beklenen güven ve konforun maksimum düzeyde olduğu ekonomik ve sürdürülebilir yolların tasarımı için yola etkiyen trafik yüklerinin zemine güvenli bir şekilde aktarılmasında üstyapı türünün seçimi çok önemlidir (Şeker ve Sarıışık, 2020). Esnek üstyapıların en iyi performansı gösterebilmesi ve yolun hizmet ömrünün artması için malzemelerin seçimi, miktarı, kalitesi, tasarımı, yapılacağı yerin şartları ve kaplamanın üretim sıcaklığına göre uygulama şekli çok dikkat edilmesi gereken konulardır. Bitümlü kaplama, üretim sıcaklığına göre soğuk karışım, yarı ılık karışım, ılık karışım ve sıcak karışım gibi çeşitli uygulamaları ile avantaj sağlamaktadır (ASMÜD, 2024).

Karayolu esnek üstyapısını oluşturan BSK, 150-180°C sıcaklık aralığında belirlenen sıcaklıkta ısıtılmış agrega karışımı (uygun gradasyona göre ayarlanmış) ile ısıtılarak akışkan duruma getirilmiş bitümün asfalt plentinde homojen bir şekilde karıştırılması ve yola serilip sıkıştırılmasıyla elde edilmektedir. Bu karışım iki farklı yöntem ile yapılmaktadır. Bu yöntemler Marshall tasarım yöntemi ve Superpave yöntemidir. Ülkemizde, Superpave yönteminin kullanımı yok denecek kadar azdır, bu yüzden BSK tasarımında genellikle Marshall tasarım yöntemi kullanılmaktadır.

Marshall yöntemi ile stabilite, akma, boşluk oranı değerleri bulunmaktadır (Şimşek, 2024). Stabilite, üstyapıların maruz kaldığı trafik yüklerinden dolayı oluşan gerilme ve deformasyonlara karşı gösterilen dirençtir. Stabilite, trafik yüklerine karşı koyabilecek kadar yüksek olmalı ama sert olup esneklik özelliğini azaltacak dolayısıyla çatlaklara sebep olacak kadar aşırı yüksek olmamalıdır (Orhan, 2012).

BSK'nın yüksek performansı için ise farklı katkı maddeleri saf bitüme karıştırılarak modifiye bitümlü karışımlar elde edilmektedir. Modifiye bitümlü karışımlar için sıklıkla tercih edilen katkı maddelerinden bazıları stiren butadiyen stiren (SBS), stiren bütadien kauçuğu (SBR), etilen vinil asetat (EVA), polietilen, lastik kauçuğu, etil vinil asetat olarak bilinmektedir (Baykara, 2021). Bitümlü sıcak karışımları modifiye etmek için kullanılan katkıların; bitümün geleneksel özelliklerini (penetrasyon, yumuşama noktası, yoğunluk, viskozite vb.), kalıcı deformasyonları, tekerlek izi oluşumunu, yaşlanma direncini, kayma direncini, nem stabilitesini, yüksek ve düşük sıcaklık performansını ve daha birçok özelliğinde olumlu etki ettiği görülmüştür (Lu ve Isacsson, 2000; Yılmaz vd., 2013; Al Hawesah vd., 2021; Li, Hao, vd., 2021; Xu vd., 2021).

Bitümlü bağlayıcılara katkı maddesi olarak çeşitli nanomalzemelerin (örneğin nano kil, nano ölçekli CaCO_3 , nano ölçekli SiO_2 , grafen ve grafen oksit) eklenmesi ile mekanik ve fiziksel özelliklerinde iyileşme ile beraber dayanıklılık performanslarında, yaşlanma ve yorulma dirençlerinde artma meydana geldiği, yapılan çalışmalar ile gösterilmiştir (Papadimitropoulos vd., 2018). Nanomalzemelerin yüzey alanı geniş ve boyutları (1-100 nm) küçük olduğundan dolayı asfalt içerisinde iyi dağılarak, asfaltın bağlayıcılığını artırarak, mikro çatlakların oluşmasını ve gelişmesini önleyerek yolun servis ömrünün uzamasına ve kalıcı deformasyonların azalmasına yardımcı olmaktadır (Li vd., 2017; Cheng vd., 2020).

Son zamanlarda, ulaşım mühendisliğinde asfalt katkı maddesi olarak, sağlık alanında bulaşıcı hastalıklarla mücadelede, çevre bilimi alanında su arıtımında, gıda ve tarım sektöründe zararlı böceklerden uzaklaştırma ve daha birçok alanda sıklıkla kullanılan bir diğer katkı ise grafen ve türevleridir (Han vd., 2021; Dey vd., 2022; Wang vd., 2022; Kumari ve Samadder, 2022; Loudiki vd., 2022).

Grafenin; grafen oksit, grafen nanoplatelet, pul grafit ve genişletilmiş grafit gibi birçok türevi vardır ama ulaşım mühendisliğinde yaygın olarak kullanılan Grafen Oksit (GO) ve Grafen Nanoplatelet (GNP)' dir (Li, Ren, vd., 2021; An vd., 2023).

Grafen, karbon elementinin altıgen biçiminde olan bal peteğine benzeyen iki boyutlu, siyah renkli, kokusuz ve toz halinde bulunan bir nanomalzemedir. Aslında yabancı olduğumuz bir malzeme değildir. Grafen tabakalarının bir araya gelerek oluşturduğu grafit malzemesi günlük hayatta kullandığımız kurşun kalemilerin içerisindeki malzemedir. Grafenin birçok endüstride kullanılmasının amacı; ısıyı çok iyi iletmesi, ışık geçirgenliği, en ince malzeme olduğu halde kuvvetli karbon bağları sayesinde bilinen en dayanıklı malzeme olması, (çelikten 100-200 kat daha sağlam), saydam, sert ve esneme özelliği sayesinde farklı biçimlerdeki malzemeleri kaplayabilmesidir (Novoselov vd., 2004; Nair vd., 2008; Stoller vd., 2008; Çiftçi vd., 2016; Qiao vd., 2018).

Grafen Nanoplatelet (GNP), bir araya toplanmış grafen tabakalarıdır. Tek bir grafen tabakası ise altıgen şeklinde düzenlenmiş karbon atomlarından oluşan tek bir tabakadır. GNP; kalınlığı 0,7-100 nm olan, grafen ile aynı özellikleri taşıyan bir nanomalzemedir. Grafen; pahalı bir malzeme olması, yaklaşık 10 yıl öncesine kadar sentezlenmesinin zor olması ve seri üretiminin olmamasından dolayı GNP düşük maliyeti ve kolay üretimi ile bir seçenek olmuştur (Hafeez vd., 2019; Jiménez-Suárez ve Prolongo, 2020).

Grafen modifiyeli asfalt bağlayıcıların (GMAB) bağlayıcılık özelliğinin çok iyi olması, yorulma ve tekerlek izi direncini iyileştirmesi ile yolu daha stabil yaptığı için yolun hizmet ömrünü artırdığı görülmüştür (Han vd., 2021; He vd., 2022; Li vd., 2022). Termal özellikler bakımından, GMAB'lerin saf bağlayıcılara göre daha yüksek hızlarda ısıtılabilirdikleri, daha yüksek sıcaklığa ulaşabildikleri ve malzeme boyunca ısının daha hızlı yayıldığı görülmüştür. Ayrıca bu durumun stabiliteyi olumsuz bir şekilde etkilemediği, bu nedenle grafen oranı arttıkça malzemenin daha büyük bir ısıtma kapasitesine sahip olduğu ve bitümün ısıtılma ve ısı transferi kapasitelerini artırarak iyileştirdiği tespit edilmiştir (Moreno-Navarro vd., 2018).

Katkı olarak GNP seçilmesinin nedeni; esnek olması, ısı iletkenliğinin çok iyi olması, yüksek gerilme direncine sahip olması ve çok dayanıklı olmasıdır. Bu özellikler sayesinde stabilitesi yüksek yollar yapılarak, yolun bakım-onarım ihtiyacı minimuma indirilir ve kaplama ömrü artar, dolayısıyla bakım-onarım masraflarını en aza indirilerek ekonomik ve sürdürülebilir yolların tasarlanmasını sağlar. Grafen yerine GNP kullanılma sebebi ise üretiminin kolay olması ve daha ekonomik olmasıdır.

Yapılan literatür çalışmalarında, bitümün GNP katkı maddesi ile modifiyesinde kullanılan karıştırma sıcaklığı, karıştırma hızı ve karıştırma süresi parametreleri çoğu çalışmada sabit tutularak, optimum seviyelerin bulunabilmesi için parametrelerin farklı seviyeleri kullanılmamıştır. Bu yüksek lisans tez çalışmasında, GNP oranı, karıştırma sıcaklığı, karıştırma hızı ve karıştırma süresi parametreleri farklı seviyelerde seçilerek Taguchi yöntemi ile bütün parametrelerin bitümün performansına etkileri ve optimum olabilecek seviyeler araştırılmıştır. Özellikle BSK'nın uygulama sıcaklıklarının altındaki ve üstündeki sıcaklık değerleri kullanılarak sıcaklığın GNP üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

Bu tez çalışması kapsamında, bitümün ağırlığınca %0; %0,35; %0,70 ve %1 GNP oranları; 145, 160, 175, 190 °C karıştırma sıcaklıkları; 15,30,45,60 dakika karıştırma süreleri ve 1000, 2000, 3000, 4000 rpm karıştırma hızı olmak üzere 4 parametre ve 4 seviye seçilerek deney planı oluşturulmuştur. Deney tasarımı için kullanılacak Taguchi Metodu ile L16 ortogonal dizisindeki bu parametre ve seviyeler dikkate alınarak laboratuvar ortamında 16 farklı modifiye bitüm karışımı hazırlanmıştır. Karışımlar hazırlandıktan sonra penetrasyon, yumuşama noktası, parlama noktası, elastik geri dönme, dönel ince film ısıtma kaybı (RTFOT) ve Marshall tasarım deneyleri yapılmıştır. Taguchi metodu ile oluşturulan 256 deney tahmini yorumlanarak parametrelerin her bir deney için uygun seviyelerine karar verilmiştir. Daha sonra belirlenen karışımlara Fourier dönüşümü kızılötesi spektroskopisi (FT-IR) deneyi yapılmıştır. Çoklu Yanıt Performans İndeksi (MRPI) optimizasyonu ile parametrelerin her bir deney için optimum olan seviyeleri tek optimuma indirilerek dört parametrenin optimum seviyeleri belirlenmiştir.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Yol üstyapılarının performanslarını iyileştirmek için bitümün farklı katkı maddeleri ile modifiye çalışmaları araştırmacılar tarafından özenle yapılmaktadır. Bu çalışmada Grafen, Grafen Oksit (GO) ve Grafen Nanoplatelet (GNP) katkı maddelerinin kullanıldığı çalışmalar araştırılmış ve bu katkıların BSK'ya etkileri incelenmiştir.

2.1. Grafen Katkı Maddesinin Kullanıldığı Çalışmalar

Aravind vd. (2018), çalışmalarında farklı oranlarda grafen katkı maddesi kullanarak modifiye edilen bitümlü karışımın performans özelliklerini incelemişlerdir. %0,05; %0,1 ve %0,15 oranlarında grafen kullanılarak modifiye edilen bitümlü karışımların saf bitüme göre sırasıyla penetrasyon değerinde %36,37; %39,47 ve %50,85 azalma; yumuşama noktası değerinde %1,06; %1,60 ve %5,04 artma; süneklilik değerinde %78,77; %81,72 ve %84,08 azalma gözlemlenmiştir. Marshall deneyi sonucunda ise %0,05; %0,1 ve %0,15 oranlarında grafen kullanımı saf bitüme göre sırasıyla Marshall stabilite değerlerinde %31,08; %45,52 ve %60,78 artış ve akma değerlerinde %7,70; %16,15 ve %16,15 artış olduğu tespit edilmiştir. Böylece grafen kullanımı ile karışımların daha stabil olduğu, performanslarının arttığı ve mukavemeti yaklaşık %14,71 oranında artırdığı sonucuna varılmıştır.

Moreno-Navarro vd. (2018), yaptıkları çalışmada bitümün ağırlığınca %0,1; %0,5 ve %1 oranlarında grafen kullanarak modifiye ettikleri bağlayıcıların mekanik ve termal özelliklerini incelemişlerdir. Farklı sıcaklık ve karıştırma süreleri denemelerinden sonra homojen bir karışım için gereken minimum değerler olan 150 °C ve 10 dakika uygun bulunmuştur. Grafen kullanımının kayma modülünü (G) artırdığı ve faz açısını (δ) azalttığı dolayısıyla bitümlerin daha esnek davranacağı ve yüksek sıcaklıklarda plastik deformasyonlara karşı daha dirençli olacağı belirtilmiştir. Optimum grafen oranının %0,5 ile %1 arasında olabileceği düşünülmüştür. Yüksek oranda grafen kullanımının sertlikten dolayı bağlayıcıyı kırılgan hale getirebileceğinden çatlak hasarına maruz kalma riskini artırdığı sonucuna varılmıştır. Termal özellikler açısından ise grafen oranı arttıkça malzemenin daha büyük ısıtma kapasitesine sahip olup bitümün ısıtılma ve ısı transferi kapasitelerini artırarak iyileştirdiği görülmüştür.

Yang vd. (2019), çalışmalarında karbon nanotüpler (CNT) ve grafen ile modifiye edilmiş bitümlerin reolojik ve mikro-yapısal özelliklerini araştırmışlardır. %0,2; %0,4; %0,6; %0,8; %1; %1,5 ve %3 oranlarında CNT ve %0,2; %0,4; %0,6; %0,8; %1 ve %1,5 oranlarında grafen eklenerek sırasıyla 170 °C sıcaklıkta 5000 rpm hızda 30 dakika karıştırılarak bitümü modifiye etmişlerdir. CNT ve grafenin (%0,2 oranı hariç) karışımın rijitlik, yüksek sıcaklıkta tekerlek izi direnci ve yorulma performansını önemli derecede artırdığını ayrıca elastik toparlanma performansı ve kaplama hizmet ömrü performansını önemli ölçüde iyileştirdiği görülmüştür. Optimum oranların %1,5 CNT ve %1 grafen olduğu belirtilmiştir. Grafen oranı %1,5'e yükseldiğinde, topaklaşma olduğu için grafen ile bitüm arasındaki bağın zayıfladığı böylece bitümün reolojik özelliğinin ve modifikasyon etkisinin zayıflayabileceği düşünülmüştür. Ayrıca %1,5 CNT + %1 grafen kompozit bitüm modifiye edilmiş ve viskoelastik özelliklerinin modifikasyonunda grafenin baskın olduğu, CNT'nin ise sadece sertlik modülünü artırdığı gözlemlenmiştir. Sem analizine göre, grafenin katmanlı bir yapı ve daha geniş spesifik yüzey alanı sergileyerek bitüm ile karışmayı kolaylaştırdığı, CNT'ye kıyasla saf bitüm ile daha uyumlu olduğu, CNT'nin ise homojen dağıldığı ve bağlanma mukavemetini artırdığı sonucuna varılmıştır.

Nazki vd. (2020), çalışmalarında VG30 (50/70) ve VG40 (40/60) viskozite dereceli bitümlere, bitümün ağırlığınca %0,5; %1,0; %1,5 ve %2,0 oranlarında grafen, 140°C sıcaklıkta, 1720 rpm hızda, 60 dakika karıştırarak hazırlanan grafen modifiyeli bitümün reolojik ve termal özelliklerini araştırmışlardır. Yumuşama noktasının VG30 bitümde VG40'a göre daha çok düştüğü, her iki bitümde de %0,5'ten sonra önemsiz değişiklikler olduğu gözlemlenmiştir. Viskozitenin %1,0 oranına kadar arttığı, %1,0'ın üzerindeki oranlarında ise azalma olmasına rağmen saf bitüme göre yüksek olduğu görülmüştür. Optimum grafen oranının %1,0 ile %1,5 arasında olduğu belirtilmiştir. Grafen ilavesinin bitümün ısı iletkenliğini %50-80 oranında artırdığı, tekerlek izini azalttığı, kalıcı deformasyonu iyileştirdiği, 163 °C'de 24 saat saklandığında depolamaya dayanıklı olduğu böylece grafen ile bitüm arasında iyi bir uyum olduğu ve grafenin etkisinin yüksek sıcaklıkta daha belirgin olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Yang vd. (2020), çalışmalarında yüksek içerikli grafenin bitüm üzerindeki kaplama ve modifikasyon etkisini araştırmışlardır. Bitümün ağırlığınca %2, %4, %6, %8 ve %10 oranlarında grafen kullanılarak, bitümü 120°C ısıttıktan sonra %2 ve %4 oranları için 145°C; %6, %8 ve %10 oranları için 150°C sıcaklıkta homojen dağılım için sırasıyla 300 rpm 20 dk, 500 rpm 20 dk, 1000 rpm 20 dk, 2000 rpm 20 dk ve 2500 rpm 40 dk olacak şekilde modifiye bitüm hazırlamışlardır. Grafen oranı arttıkça bitümün esneklik, yüksek sıcaklıkta tekerlek izi direnci, mukavemet ve viskozite özelliklerinin arttığını görmüşlerdir. Grafenin, bitümlerin karıştırma ve sıkıştırma sıcaklığını iyileştirdiğini dolayısıyla kaplama yapımını kolaylaştırdığı sonucuna varmışlardır. Grafenin yüksek sıcaklıklardaki modifikasyon etkisinin düşük sıcaklıklardakinden daha üstün olduğunu (çünkü grafenin sıcaklık duyarlılığı çok fazladır) ve %8'den sonraki oranlarda iletken bitümlü kaplamalar yapılabileceğinin mümkün olduğunu belirtmişlerdir.

Li, Wang, vd. (2021), çalışmalarında 70/100 bitümün ağırlığınca %0,5; %1 ve %1,5 oranlarında grafen katkı maddesi kullanarak 135°C sıcaklıkta, 3000 rpm hızda 2 saat karıştırarak elde ettikleri GMAB'lerin fiziksel, reolojik ve modifikasyon mekanizması özelliklerini analiz etmişlerdir. Grafenin eklenmesi ile bitümün yumuşama noktası ve viskozitesinin arttığı, penetrasyon ve sünekliliğin azaldığı, yaşlanma önleyici özelliğinin iyileştiği, kayma modülünün arttığı böylece deformasyon direncinin arttığı, kıvamının artmasıyla asfalten görevi gördüğü dolayısıyla modifiye bitümün elastik ve yüksek sıcaklık performansının iyileştiği, sıcaklık duyarlılığını olumlu etkilediği ama düşük sıcaklık özelliğini olumsuz etkilediği sonucuna varmışlardır. Optimum grafen oranını %1 olarak belirlemişlerdir. FT-IR sonuçlarına göre, grafen ve bitümün fiziksel reaksiyon ile etkileşime girdiğini, hiçbir kimyasal reaksiyon meydana gelmediğini gözlemlemişlerdir.

Şimşek (2021), yaptığı tez çalışmasında Taguchi metodu kullanarak bitümün modifiyesi için kullanılan parametrelerin optimizasyonunu yapmıştır. 70/100 penetrasyonlu saf bitümü modifiye etmek için grafen oranı (%0,5; %1; %1,5), karıştırma hızı (1000,2000, 3000 rpm) ve karıştırma süresi (30,45,60 dakika) parametreleri ve 155°C sabit karıştırma sıcaklığı kullanmıştır. Penetrasyondaki düşüşün RTFOT öncesi %8,8 - %20,6 ve RTFOT sonrası %34 - %44 arasında olduğu, yumuşama noktasındaki artışın RTFOT öncesi %6 - %21 ve RTFOT sonrası %10 - %22 arasında olduğu, grafen oranı arttıkça parlama noktasının düştüğü, düktilite değerinin ise %5,5 - %13,7 arasında düştüğü görülmüştür.

En fazla düşüş ve artışların %1,5 oranında olduğu görülmüştür. RTFOT sonuçlarına göre saf bitümde kütle kaybı %0,74 iken %0,5 ve %1 oranlarında sırasıyla %13 ve %3 artarken %1,5 oranında ise %3 azaldığı görülmüştür. Optimum parametreler; penetrasyon için RTFOT öncesinde %0,5 oran, 3000 rpm ve 30 dk, RTFOT sonrası %0,5 oran, 1000 rpm ve 30 dk, yumuşama noktası için RTFOT öncesi ve sonrası için %1,5 oran, 1000 rpm ve 60 dk bulunmuştur.

Wang vd. (2022), çalışmalarında grafen ile modifiye edilmiş bitümlü bağlayıcıların sıcaklık performansı, dağılımı ve uyumluluğunu araştırmışlardır. Bağlayıcının toplam ağırlığına göre %0,3; %0,65; %1; %1,5; %2,5; %5 ve %7 oranında grafen kullanarak sırasıyla 155°C sıcaklıkta 15.000 rpm hızda 60 dakika karıştırarak modifiye etmişlerdir. Sonuç olarak, grafen kullanımının %1,5 oranına kadar bitümlü bağlayıcılarda iyi dağıldığını, %1 oranına kadar bitümlü bağlayıcıların viskozitesini biraz artırdığını, tekerlek izi direncini önemli ölçüde iyileştirdiğini, %0,65 grafen oranına kadar yorulma çatlama ve termal çatlama direnci üzerinde çok az olumsuz etkiye sahip olduğu böylece optimum grafen oranının %0,65 olduğu ayrıca grafen ile bitümlü bağlayıcılar arasında iyi bir uyumluluk olduğu sonucuna varmışlardır.

Wang vd. (2022), yaptıkları çalışmada bitümlü bağlayıcılarda grafen ve türevleri olan GO ile GNP'nin bitümün performansı üzerindeki etkilerini ve modifikasyon mekanizmalarını incelemişlerdir. Bu katkıların bitümlü bağlayıcıların yüksek sıcaklık performansını, nem stabilitesini, yaşlanma direncini ve tekerlek izi direncini iyileştirdiğini ancak düşük sıcaklık performansı üzerindeki etkisi katkı malzemelerinin dağılımına bağlı olduğunu belirtmişlerdir. Katkı maddelerinin dağılımı için doğrudan ekleme yöntemi (DAM), dolaylı ekleme yöntemi (IAM) ve yardımcı ekleme yöntemi (AAM) olarak açıklanmıştır. İyiden kötüye dağılımın IAM (çözelti ile karıştırma), AAM (fonksiyonel grup şeklinde) ve DAM olduğunu açıklamışlardır. IAM ile AAM'nin katkı oranını azaltabileceği ve bağlayıcı içinde dağılımlarını iyileştirebileceği sonucuna varmışlardır. Grafen ve GNP'nin bitüm modifiyesinde sadece fiziksel reaksiyonların olduğu GO'da ise kimyasal reaksiyonunda olabileceği düşünülmüştür.

Polo-Mendoza vd. (2023), bu çalışmada grafen ve türevleri olan GO ve GNP ile modifiye edilmiş bağlayıcılar hakkında detaylı bir literatür taraması yapmışlardır. Bu katkıların kullanımının yaşlanma, yorulma, tekerlek izi ve nem hasarına karşı artan direnç ve termal duyarlılığın azalması gibi avantajlardan dolayı yüksek performanslı bağlayıcılar üretmek için kullanılabileceğini açıklamışlardır. Katkıların davranışını incelemek için geleneksel laboratuvar deneylerinin (yoğunluk, penetrasyon, yumuşama noktası, dinamik viskozite, süneklik, parlama noktası, çözünürlük) yetersiz olduğunu belirtmişlerdir. Bu nedenle kimyasal, reolojik, mikroyapısal, morfolojik, termogravimetrik ve yüzey topografyası özelliklerine ilişkin değerlendirmeler yapmak, özellikle AFM (atomik kuvvet mikroskobu), DSC (diferansiyel tarama kalorimetrisi), DSR (dinamik kayma reometresi), EA (element analizi), FT-IR (fourier dönüşümü kızılötesi spektroskopisi), RS(Raman spektroskopisi), SEM (taramalı elektron mikroskobu), TGA (termogravimetrik analiz), XRD (X-ışını kırınımı) ve XPS (X-ışını fotoelektronu) testlerinin kullanılması gerektiğini belirtmişlerdir

2.2. Grafen Oksit (GO) Katkı Maddesinin Kullanıldığı Çalışmalar

Habib vd. (2015), çalışmalarında 80/100 penetrasyon dereceli bitümün ağırlığınca %0,1125 ve %0,225 oranlarında grafen oksit (GO) kullanarak modifiye edilen bağlayıcının mekanik performansını incelemişlerdir. GO ile modifiye edilen bitümün saf bitüme göre elastik modülünde artış gözlemlenmiştir. Bu artışın daha yüksek sıcaklıklarda daha çok artacağı düşünülmüştür. GO kullanımı ile bağlayıcının viskozitesinin arttığı ve tekerlek izi potansiyelinin azaldığı ayrıca yaşlanma ve yorulma dirençlerinde iyileşme olduğu belirtilmiştir.

Adnan vd. (2020), çalışmalarında GO katkısı ile modifiye edilen BSK'nın mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Modifiye bitüm için %0,5; %1; %1,5; %2 ve %2,5 oranlarında GO, 60/70 bitüme eklenerek 160°C sıcaklıkta 4000 rpm hızla 45 dakika karıştırmışlardır. GO modifiyeli bitümlerin saf bitüme göre sırasıyla penetrasyonda %6,57; %8,03; %12,4; %18,25; %17,52 azalma; yumuşama noktasında %0,82; %2,24; %5,92; %8,16; %4,9 artma; viskozitede %1,82; %5,45; %5,45; %10,9; %9,1 artma; süneklilikte %5,07; %12,32; %16,67; %21,74; %26,08 azalma görülmüştür. Bu değerlere göre optimum GO oranı %2 bulunmuş ve %1, %1,5 oranlarını da değerlendirmişlerdir.

%1, %1,5 ve %2 oranında GO'nun dahil edilmesi ile sırasıyla, kalıcı deformasyonda %31,58; %57,89 ve %64,47 azalma, Marshall stabilite değerlerinde %16,6; %20,24; %22,27 artma, akma değerlerinde %6,67; %11,47 ve %14,67 azalma olduğu ayrıca saf bitüm dahil karışımdaki boşluk yüzdeleri sırasıyla %3,3; %4; %3,6; %3,4 olarak bulunmuştur. Sonuç olarak nem stabilitesi, çekme mukavemeti, kırılma direnci, çatlama direnci, tekerlek izi direnci ve esneklik modülünde artma olduğu belirtilmiştir.

Zhu vd. (2020), daha önce yaptıkları çalışmada belirledikleri optimum %0,05 oranında GO kullanarak 160°C sıcaklıkta, 3000 rpm hızda 45 dakika karıştırarak bitümü modifiye ederek performansını incelemişlerdir. GO ile modifiye edilmiş bitüm karışımının saf bitüme göre penetrasyonunu %17,19 azalttığı, yumuşama noktası değerini %63,54 artırdığı, sünekliliğini %1,21 azalttığı, dinamik viskozite değerini 5,6 kat artırdığı gözlemlenmiştir. RTFOT kütle kaybının -0,02 iken -0,01 olduğu görülmüştür. GO kullanımı, bitüm ile agreganın yapışmasını ve karışımın nem direncini geliştirmiştir. Ayrıca bitüm yüzeyinin nano pürüzlülüğünü iyileştirerek yaşlanmanın bitüm ve agrega arasındaki yapışma üzerindeki olumsuz etkisini azaltmaya yardımcı olduğu belirtilmiştir.

Jyothirmai vd. (2020), bu çalışmada GO ile modifiye edilen 80/100 penetrasyon dereceli bitümün performansını incelemişlerdir. %1 ve %3 oranlarında GO ile modifiye edilmiş bitüm karışımının saf bitüme göre penetrasyonunu %1 oranında etkilemediğini ve %3 oranında %1,2 azalttığını, yumuşama noktası değerini %1 oranında %1 ve %3 oranında %1,59 artırdığını, sünekliliğini %1 oranında %6,75 ve %3 oranında %21,47 azalttığını böylece bitümün performansını iyileştirdiğini belirtmişlerdir. GO modifiyeli bitüm, oksijenin bitüm ile temasını önleyerek yaşlanma sürecinde bitümün oksidasyonunu azaltarak bitümün yaşlanma karşıtı performansını artırdığı sonucuna varmışlardır.

Zeng vd. (2020), bu çalışmada GO sentezleyip daha sonra modifiye bitüm için kullanarak bitümün fiziksel özellikleri üzerindeki etkisini ve mikro yapısını araştırmışlardır. %0,1; %0,3; %0,5; %0,7; %0,9 oranlarında GO sırasıyla kullanılarak 150°C sıcaklıkta, 4000 rpm hızda 30 dakika süreyle karıştırılarak bitümü modifiye etmişlerdir. Saf bitüme göre, GO oranı arttıkça yumuşama noktası ve viskozitesinde düşük oranlar için hızlı arttığı, %0,5'in üzerindeki oranlar için ise yavaş arttığı ayrıca penetrasyonu %0,3 oranına ulaştığında hızla azalan diğer oranlara nispeten daha az azaldığı, sünekliliğin ise %5 e kadar diğer oranlara göre daha hızlı düştüğü görülmüştür. RTFOT sonrası penetrasyon,

RTFOT öncesine göre saf bitümde %16,62 oranında; %0,9 oranında GO modifiyeli bitümde %27,31 oranında azalma olduğu görülmüştür. Optimum oranın %0,05 ile %0,07 arasında olduğu düşünülmüştür. GO'nun kullanımı bitümün yüksek sıcaklıktaki stabilitesini belirli bir dereceye kadar artırdığı, yaşlanma direncini artırdığı ama düşük sıcaklıktaki çatlama direncini iyileştiremediği sonucuna varmışlardır. SEM ile 3000 kez büyütülmüş görüntülere göre; %0,5 oranında GO kullanımı bitümde homojen dağıldığı ve fazla topaklanmadığı, fakat oran arttıkça GO molekülleri arasındaki etkileşim arttığından dağılım düzeninin bozulduğu görülmüştür.

Wang, Qi, vd. (2020), çalışmalarında %0,5; %1,0 ve %1,5 oranlarında GO sırasıyla 155°C de ısıtılmış bitüm ve 170°C ısıtılmış %3 oranında stiren-butadienestiren blok kopolimerle (SBS) modifiye edilmiş bitümlü bağlayıcıya eklenerek 120°C sıcaklıkta 5000 rpm hızda 45 dakika karıştırılarak GO modifiyeli bitüm karışımları elde etmişlerdir. GO kullanım oranı arttıkça, yüzey serbest enerjisinin (bitümlü karışımın yorulma çatlağını ve neme duyarlılığını etkileyen önemli bir malzeme özelliğinin) arttığı, dolayısıyla bitümlü bağlayıcı ile agrega arasındaki yapışmanın arttığı sonucuna varmışlardır. Ayrıca FT-IR analizine göre GO ile modifiye edilmiş bitümlü bağlayıcıların stabil ve homojen uyumluluğunu doğrulamışlardır.

Adnan vd. (2022), çalışmalarında 60/70 bitüme ağırlıkça %0,5; %1; %1,5; %2 ve %2,5 oranlarında GO kullanarak 160°C sıcaklıkta, 4000 rpm hızda 45 dakika karıştırarak modifiye bitümlü karışımlar hazırlayıp bitüme etkisini incelemişlerdir. GO oranı arttıkça yumuşama noktasının arttığı, sünekliğin önemli ölçüde azaldığı, penetrasyonun azaldığı, RTFOT sonrası kütle değişiminin biraz azaldığı görülmüştür. Bitüm viskozitesi sıcaklığın artmasıyla azalırken, GO oranı arttıkça viskozitenin de arttığı böylece yüksek çalışma sıcaklıklarında işlenebilirliği artırabileceği düşünülmüştür. GO kullanımı ile Marshall stabilitesi ve agregalar arası boşluk (VMA) artırırken, akma ve karışımdaki toplam boşluk (VTM) azalmıştır. Dolayısıyla bitümün dayanıklılığını ve tekerlek izi deformasyon direncini artırdığı sonucuna ulaşılmıştır. %2 GO oranının diğer oranlara göre daha iyi sonuç göstererek yüksek ve düşük sıcaklıkta en iyi performansa sahip olduğu belirtilmiştir. GO'nun bitüm içinde homojen dağıldığı, böylece bitümün yapışma özelliğini geliştirdiği ve bitüm performansını artırdığı, fakat aşırı GO kullanımında topaklaşma olduğu ve bu yüzden homojen dağılım olmadığı görülmüştür.

Qian vd. (2022), yaptıkları çalışmada biyo-asfaltın performansını artırmak için, GO kullanarak GO modifiyeli biyo-asfaltlar hazırlamışlardır. Bitümün %15'i kadar biyo-yag ile biyo-asfalt hazırlanarak, biyo-asfaltın ağırlığınca %0,02; %0,05 ve %0,08 oranlarında GO ekleyerek ve 160°C sıcaklıkta, 4500 rpm hızda 30 dakika karıştırarak bitümü modifiye etmişlerdir. %15 biyo-yag kullanımının, saf bitüme göre penetrasyonda %6,6 artma, yumuşama noktasında %5,6 azalma, süneklilikte %6,5 artma sağladığı görülmüştür. Ayrıca, %15 biyo-yaga sırasıyla eklenen %0,02; %0,05 ve %0,08 GO'nun %15 biyo-yag modifiyeli karışımlara göre sırasıyla penetrasyonda %1,9; %3,3; %3,5 azalma; yumuşama noktasında %11,5; %16,5; %17,8 artma; süneklilikte %2; %4,1; %7 artma sağladığı görülmüştür. Diğer çalışmalardaki sadece GO kullanımı sünekliliği azaltırken, biyo-yag + GO kullanımı sünekliliği artırmıştır. GO modifiyeli bitümlerin biyo-asfaltlara göre tekerlek izi faktörlerini iyileştirdiği, düşük sıcaklıktaki çatlama direncini çok etkilemediği görülmüştür. Biyo-asfaltın saf asfalta göre kütle kaybında belirli bir artış olduğunu ve GO modifikasyonundan sonra kütle kaybı oranında azalma olduğu tespit edilmiştir.

2.3. Grafen Nanoplatelet (GNP) Katkı Maddesinin Kullanıldığı Çalışmalar

Brcic (2016), yaptığı tez çalışmasında. %1; %1,5 ve %2 oranlarında GNP ile 70/100 penetrasyon dereceli bitümü 6, 15, 20, 26, 30 ve 40 dakikalarda 160°C sıcaklıkta farklı karıştırma hızları ile karıştırarak GNP'nin bitümün davranışı üzerindeki etkisini araştırmıştır. Karıştırma hızı GNP yüzdesine bağlı olarak değişmiştir (%2 oranı ile modifiye edilen bitümü elle ve 300 rpm hızda, %1 ve %1,5 oranları için ise 150 rpm hızda) çünkü az süre ve düşük hızla karıştırmada topaklanma olduğu görülmüştür. GNP'nin yüksek spesifik yüzey alanı nedeniyle %2 veya daha fazla GNP içeriğinin uygun ekipman olmadan bitümle karıştırılmasının zor olduğu görülmüştür. GNP oranının artması ile hem RTFOT öncesi hem de RTFOT sonrası bitüm bağlayıcıların sertliğinde artış sağladığı dolayısıyla kalıcı deformasyon direncinin ve elastik geri kazanımının arttığı belirtilmiştir.

Marasteanu vd. (2016), ağırlıkça %3 ve %6 oranlarında farklı türde GNP malzemeleri ile modifiye edilmiş bitümlü bağlayıcıların reolojik özelliklerini değerlendirmişlerdir. GNP kullanımının, düşük sıcaklıklarda mukavemeti artırdığını, saf bitümün sertliğini yaklaşık iki kat artırdığını, esnekliğini geliştirdiğini, karışımların tekerlek izi performansını olumsuz etkilemeden sıkıştırmayı kolaylaştırdığını ve malzeme üzerinde işlenebilirliğini artırabilecek bir yağlayıcı etki gösterdiğini belirtmişlerdir. Kullanılan GNP türü ile ilgili olarak, karbon içeriğinin artması ve yüzey alanının azalması bitüm sertliğini artırdığı sonucuna varmışlardır. Ayrıca DSR testine göre GNP eklenmesinin, orta ve yüksek sıcaklıklarda bağlayıcının reolojik özelliklerini (kayma modülünü ve faz açısını) önemli ölçüde etkilemediğini göstermiştir. Ağırlıkça %5,5 bağlayıcı oranına sahip bir Superpave karışımında hava boşluğunun saf bitümle hazırlanan numuneye kıyasla GNP'li numunelerde %2'lik azalma olduğunu tespit etmişlerdir.

Han vd. (2018), bu çalışmada %0,03; %0,04; %0,05; %0,06 ve %0,07 oranlarında GNP ve %5 stiren-butadien-stirene (SBS) ile GNP/SBS modifiye bitüm hazırlamışlardır. PS-GNP/SBS modifiye asfaltın hazırlanması için, Polistiren (PS) ve GNP kompoziti (PS-GNP) hazırlanmışlardır. Ayrıca GNP oranını sabit tutarak %0,02; %0,03; %0,035; %0,04 oranlarında PS-GNP kullanılarak farklı karışımlar hazırlamışlardır. GNP kullanımı diğer çalışmalarda gösterdiği etkileri göstermiştir. PS-GNP içeriğinin artmasıyla yumuşama noktasının arttığını, penetrasyonun azaldığını ardından arttığını, sünekliğin ise bir miktar azaldığını (süneklik açısından, GNP'nin etkisi PS-GNP'den daha iyi) ve daha sonra kademeli olarak arttığını göstermektedir. Belirli miktarda PS-GNP eklenmesi SBS ile modifiye edilmiş bitümün süneklik, yumuşama noktası, penetrasyon, yorulma önleme özelliğini, yüksek sıcaklıkta tekerlek izi direnci, düşük sıcaklıkta çatlama direnci, elastik özellik ve depolama stabilitesini olumlu etkilediği, dağılımlarını büyük ölçüde iyileştirdiği ve elde edilen modifiye bitümün yüksek performansı ile maliyeti düşürdüğünü belirtmişlerdir.

Hafeez vd. (2019), çalışmalarında %2 ve %4 oranlarında GNP katkılı bitümün yapısal ve fonksiyonel performansını incelemişlerdir. GNP'nin küçük boyutu ve yüksek yüzey alanı sayesinde bitümle güçlü bağlar oluşturduğunu görmüşlerdir. %2 ve %4 oranlarında GNP kullanımı ile saf bitüme göre sırasıyla penetrasyon değerinde %34,43 ve %47,54 azalma; yumuşama noktası değerinde %3,13 ve %18,75 artma olduğunu belirtmişlerdir. Bitümlü

karışımlarının optimum bağlayıcı içeriğini Marshall yöntemi kullanarak sırasıyla saf bitüm, %2 ve %4 için 4,38; 4,49 ve 4,67 bulduklarını GNP oranı arttıkça optimum bağlayıcı içeriğinin de arttığını belirtmişlerdir. GNP modifiyeli bitümün başlangıç maliyetinin geleneksel bitümlerden fazla olacağını ancak bakım-onarım maliyetini azaltacağı düşünülmüştür. GNP'lerin bitümlü bağlayıcıda diğer nanomalzemelere göre daha homojen dağıldığını, kaplamanın tekerlek izi direncini, bitüm ile agrega arasındaki yapışma mukavemetini, sertliğini, kayma direncini ve nem direncini artırdığını; ayrıca sıcaklık ve neme duyarlılığını azalttığını dolayısıyla dayanıklılığını artırdığını belirtmişlerdir. Bu nedenle, GNP'nin çok yönlü bir değiştirici olduğunu ifade etmişlerdir.

Chen vd. (2020), yaptıkları çalışmada bitümlü kaplamanın servis ömrünü uzatmak ve servis ömrü boyunca performansını iyileştirmek için %18 oranında kauçuk tozu ve %0,05 oranında GNP kullanarak 185°C sıcaklıkta, 45 dakika karıştırarak bitümü modifiye etmişlerdir. Kayma modülünün (G), sıcaklık stabilitesinin ve tekerlek izi faktörünün sıcaklığın artmasıyla azaldığını ve katkı durumuna göre GNP/kauçuk tozu kompozit modifiye bitüm > kauçuk tozu modifiyeli bitüm > saf bitüm olduğu, faz açısının (δ) ise sıcaklığın artmasıyla arttığı ve katkı durumuna göre saf bitüm > kauçuk tozu modifiyeli bitüm > GNP/kauçuk tozu kompozit modifiyeli bitüm olduğunu ifade etmişlerdir. Sonuç olarak, kauçuk tozu modifiyeli bitümde GNP kullanımının; bitüm sıcaklığının artmasıyla kaplamanın zayıflayan yüksek sıcaklık performansı iyileştirdiği, düşük sıcaklıkta çatlama direncini artırdığı, tekerlek izi sorununu azalttığı, bitüm ile agrega arasındaki yapışmayı artırdığı, mekanik özellikleri güçlendirdiği dolayısıyla ağır yüklü trafiğe uygun olduğunu ve hizmet ömrünü artıracaklarını ifade etmişlerdir.

Jiménez-Suárez ve Prolongo (2020), yaptıkları çalışmada GNP'nin malzemeler üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. GNP'nin mekanik ve tribolojik (aşınma, sürtünme) davranışları geliştirdiği, termal iletkenliği artırdığı, alev geciktirici görev gördüğü, malzemelerin su emme yeteneklerini azaltarak nemli ortamlara karşı direncini artırdığı, donma-çözülme direncini artırdığını ortaya koymuşlardır. Bu özellikleri ile son on yılın en öne çıkan nano dolgu malzemelerinden biri olarak kabul edildiği belirtmişlerdir.

Zhou vd. (2021), çalışmalarında %0,4 oranında GNP ve %3,6 oranında polietilen (PE) katkılarını birlikte kullanarak modifiye ettikleri bitümün özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Yapılan deney sonuçlarına göre; penetrasyonda azalma (esneklik ve deformasyon özelliğinde iyileşme), yumuşama noktasında artma (yüksek sıcaklık özelliğinde iyileşme), süneklikte artma (düşük sıcaklık özelliğinde iyileşme yani çatlama direncinde artma) olduğunu ifade etmişlerdir. Sıcaklığın artmasıyla azalan viskozitenin, katkıların kullanımı ile arttığı dolayısıyla yüksek karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları gerektirdiği, bu durumun ise fazla enerji tüketimine neden olduğunu belirtmişlerdir. Sıcaklık Taraması (TeS) testi sonucunda bitümün elastikliğini ve deformasyon direncini artırdığı, Çoklu Stres Sünme ve Geri Kazanım Testine (MSCR) göre bitümün elastik toparlanma performansını artırarak yüksek sıcaklıkta tekerlek izi direncini artırdığı, Doğrusal Genlik Taraması (LAS) testi sonucunda yorulma çatlaklarının yayılmasını engelleyerek yorulma direncini iyileştirdiği, Alan Emisyonlu Taramalı Elektron Mikroskopuna (FESEM) göre bitüm karışımının GNP ilavesi ile esnekliği artırdığı, PE ilavesi ile sertlikten dolayı kırılgan olabileceği ve yaşlanma direncini etkileyebileceği, Fourier Dönüşümü Kızılötesi Spektroskopisi (FT-IR) analizine göre PE/GNP kompozit bitümde kimyasal bağın olmadığı ve reolojik özelliklerinin fiziksel modifikasyonla artırıldığı sonucuna varmışlardır.

Wu vd. (2022), çalışmalarında GNP ile modifiye edilmiş stiren-butadien-stiren (SBS) bitümün yüksek sıcaklıktaki reolojik özelliklerini ve termal stabilitesini araştırmışlardır. SBS ile modifiye edilmiş bitümün ağırlığınca %0,5; %1; %1,5 ve %2 oranlarında GNP kullanarak 175°C sıcaklıkta ,5000 rpm hızda 60 dakika karıştırarak GNP/SBS modifiyeli bitüm hazırlamışlardır. GNP'nin 0,1 ve 3,2 kPa gerilim seviyelerinde; elastik toparlanmayı sırasıyla %13,3; %30 ve %0,59; %50,6 oranında artırdığı, geri kazanılamayan sürünme uyumunu sırasıyla %58,8; %73,8 ve %61,5; %78,5 oranında azalttığını ifade etmişlerdir. Aşırı GNP kullanımının bitümde topaklaşması ile homojen dağılım göstermediğini düşünmüşlerdir. Optimum GNP oranının %1,5 olduğu sonucuna varmışlardır. %1,5 GNP kullanımı ile özgül ısı kapasitesinin %174,8 ve ısı emiliminin %75,87 azaldığını belirtmişlerdir. Sonuç olarak; GNP'nin SBS modifiyeli bitüm ile uyum sağlayarak sıcaklık hassasiyetini artırdığı, reolojik özelliklerini iyileştirdiği, yüksek sıcaklıkta daha elastik tepki ürettiği, tekerlek izi direncini geliştirdiği ve termal stabilitesini artırdığını tespit etmişlerdir.

Ghalandari Shamami vd. (2023), bu çalışmada %0,1; %0,3 ve %0,5 oranlarında GNP kullanarak 150°C sıcaklıkta, 4500 rpm hızda 45 dakika karıştırma ile modifiye edilen BSK'nın performansını araştırmışlardır. Penetrasyonda azalma, yumuşama noktası ve vizkozitede artma olduğunu ve optimum oranın %0,5 olduğunu ifade etmişlerdir. Dolaylı Çekme Sertlik Modülü (ITSM) Testine göre 5°C, 25°C ve 40°C sıcaklıklarda deformasyonda azalma olduğu, sıcaklıklara göre sertlik modülünde %15, %36 ve %54 artma olduğunu tespit etmişlerdir. Dolaylı Çekme Yorulma Testine (ITF) göre yorulma performansında iyileşme göstererek çatlaklarının yayılmasına karşı direncini artırdığını ifade etmişlerdir. Tekrarlanan Eksenel Yük (RLA) Testine göre karışımların kalıcı deformasyona karşı direncini artırdığını ve viskozitedeki düşüşle tetiklenen tekerlek izi oluşumunu iyileştirdiğini belirtmişlerdir. Dolaylı Çekme Dayanımı Testine (ITS) göre dolaylı çekme dayanımının kuru ve ıslak şartlarda artması ile karışımın nem hassasiyetini azalttığını ifade etmişlerdir. SEM gözlemine göre GNP ile bitümün uyum sağladığını gözlemlemişlerdir. Basınç Dayanımı Testine göre yoğun trafik seviyelerinde basınç dayanımı artırdığını belirtmişlerdir. Ekonomik açıdan, standarda göre yol kaplama tasarımı esneklik modülü kullanılarak yapıldığı için bitüm kaplama kalınlığını azaltmakta ve yapım maliyetlerinin yüksek olmasına rağmen, gelişmiş performansından dolayı bakım-onarım maliyetleri zamanla azaltarak daha ekonomik olduğunu ifade etmişlerdir.

3. KURAMSAL TEMELLER

3.1. Karayolu

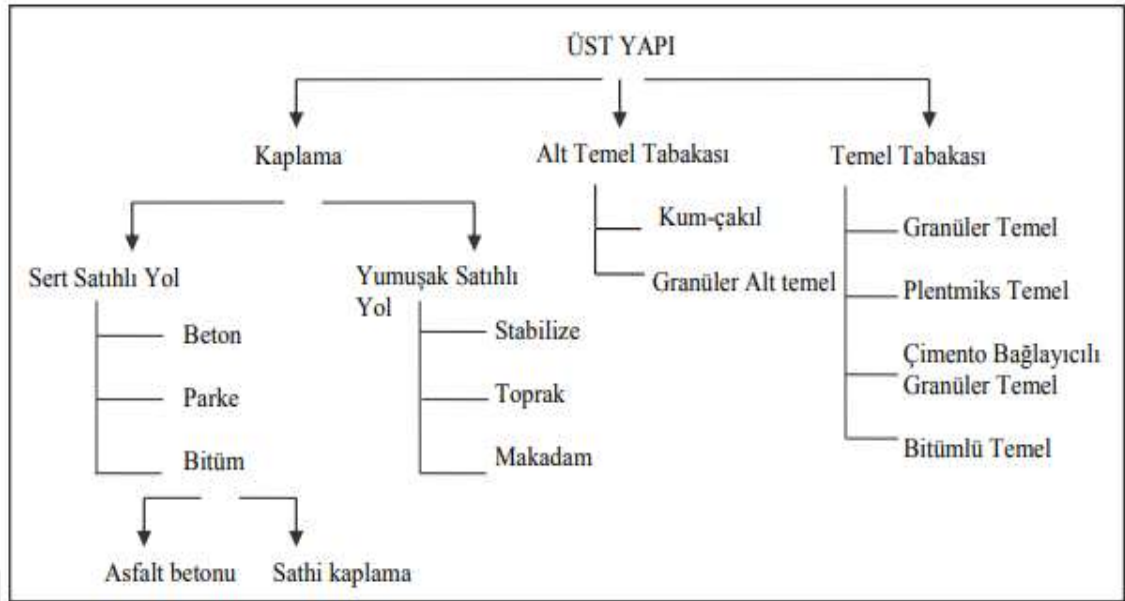
Karayolları, kara taşımacılığında kullanılan yollardır. Karayolu ulaşımı, geçmişten bugüne önemli ölçüde gelişmiştir ve gelişimi hızla devam etmektedir. Çünkü karayolu ulaşımı; bir ülkenin ekonomik büyümesinde, sanayi gelişiminde, ticaret gelişiminde, eğitim, sağlık, sosyal hizmetler gibi alanlarda kolay erişim sağlayarak yaşam konforunu artırmakta ve ülkenin gelişimine önemli katkılar sağlamaktadır. Karayolu yapıları, altyapı ve üstyapıdan oluşmaktadır.

3.1.1. Karayolu altyapısı

Ulaşım kolaylığı için karayollarındaki doğal zeminler, enkesite dönüştürülerek enkesitlerde yarma ve dolgu işlemleri ile toprak işi yapılmaktadır. Toprak işinden sonra proje kapsamındaki kot ve enkesit durumuna getirilen kısımlar yolun ana taşıyıcısı olan altyapısını oluşturmaktadır. Geçmişte daha az önem verilen altyapı şimdi üstyapının oturduğu altyapı ve zemin durumu, yol yapım ve bakım-onarım maliyeti açısından önemli olduğu görülmüştür. Toprak işleri haricinde yolun hizmet yılını ve performansını artırmak için yapılan menfezler, istinat duvarları, köprüler, viyadükler ve tüneller de yol altyapısıdır (Yayla, 2014).

3.1.2. Karayolu üstyapısı

Karayolu üstyapısı, yollara uygulanan trafik yüklerini taşıyan ve bu yükleri altyapıya güvenli bir şekilde azaltarak aktaran alt temel, temel ve kaplama tabakalarından biri ya da birkaçının aynı anda kullanılması ile oluşan katmanlı bir sistemdir. Üstyapının oluştuğu tabakalar ve bu tabakaların türleri Şekil 3.1’de gösterilmiştir (Karakaş, 2014).

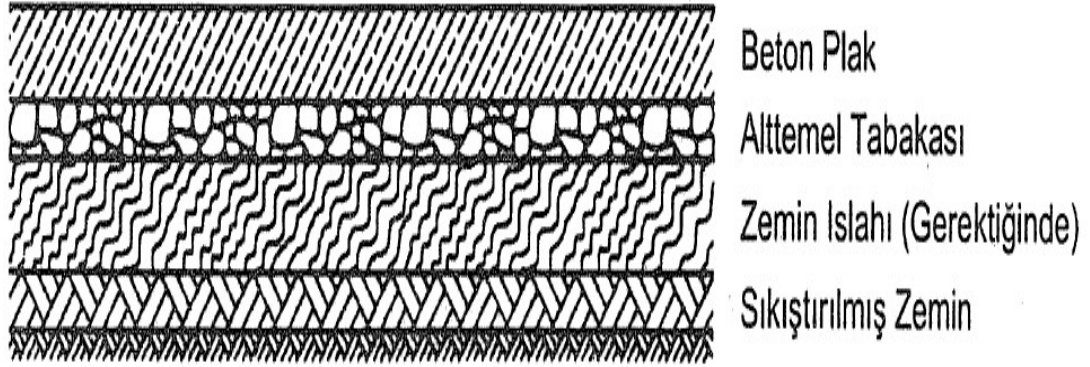


Şekil 3.1. Karayolu üst yapı tabakaları ve türleri

Karayolunda kullanılan kaplama çeşitleri kullanıldıkları bağlayıcı malzeme ve gösterdikleri davranışlara göre ele alındıklarında esnek üstyapılar, rijit üstyapılar ve kompozit üstyapılar olacak şekilde üç gruba ayrılmaktadırlar. Esnek üstyapıda bağlayıcılık sağlayan malzeme asfalt çimentosu (bitüm), rijit üstyapıda portland çimento (beton), kompozit üstyapıda ise beton ve asfalt birlikte kullanılmaktadır. Katmanlı sistemin, sıkıştırılmış taban zemininden yukarıya doğru sırasıyla esnek üstyapılarda: alt temel tabaka, temel ve bitümlü kaplama; rijit üstyapılarda: alt temel ve beton kaplama; kompozit üstyapılarda ise kırmataş temel, silindirle sıkıştırılmış beton ve bitümlü kaplama tabakalardan oluşmaktadırlar (Abut, 2019; Araz vd., 2023; Orhan ve Bahadır, 2023).

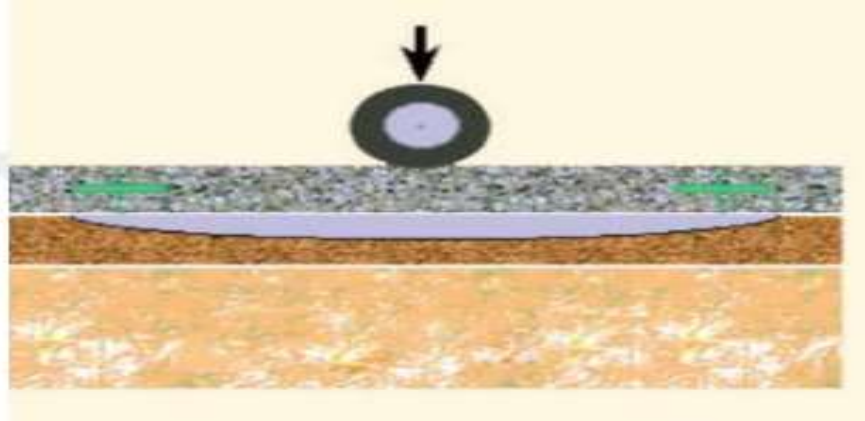
3.1.2.1. Rijit üstyapılar

Rijit üstyapılar; trafik yüklerini tabana aktaran, altyapıyı koruyup zeminin deforme olmasını engelleyen, bağlayıcı malzeme olarak beton kullanılan, ağır ve yüksek trafik hacmine sahip yollarda Şekil 3.2' de görüldüğü gibi granüler bir alt temel tabakası üzerine yapılan beton plaklardan oluşan üstyapı çeşididir.



Şekil 3.2. Rijit kaplama tabakaları

Beton plaklar, yüksek rijitlik özelliği sayesinde tabanda meydana gelen gerilmeleri Şekil 3.3'te görüldüğü gibi geniş bir alana yaymaktadırlar. Böylece zeminin zayıf olduğu yolların yapımında kullanımı artmaktadır. Betonun çekme dayanımı düşüktür ayrıca deformasyon-gerilme ilişkisi doğrusal değildir. Yola yük uygulandıktan sonra betonda kalıcı şekil değişiklikleri olabilir ve yük kaldırıldığı halde beton eski haline dönmeyebilir. Sıcaklık değişimi ile beton kaplamalarda genleşme veya büzülme eğilimi artarak termal gerilmelere yol açabilmekte ayrıca donma-çözülme olayı ile betonun yüzey pürüzlülüğünü etkileyebilmekte ve çatlaklara neden olabilmektedir (Şimşek, 2024).



Şekil 3.3. Rijit kaplamada yük dağılımı (Yeğinobalı, 2009)

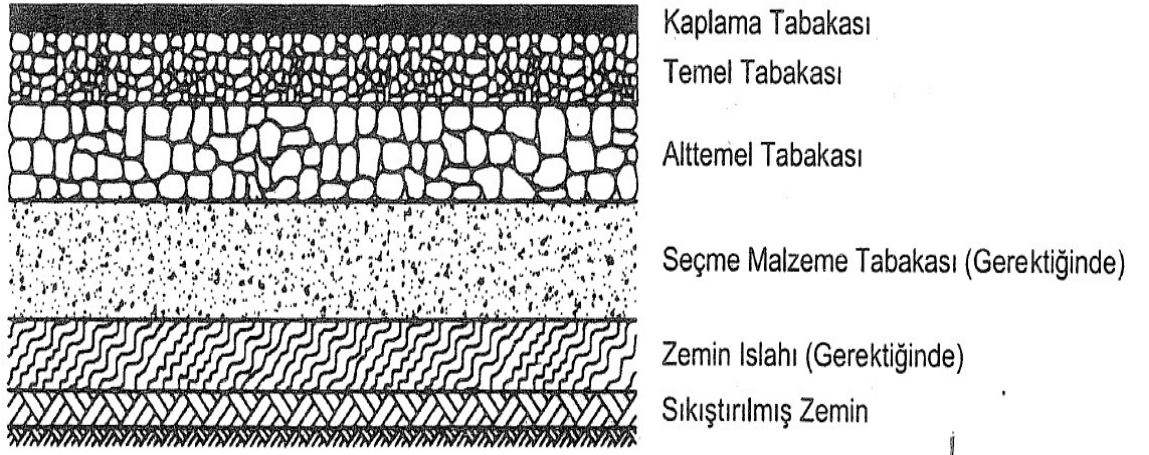
3.1.2.2. Kompozit (yarı rijit) üstyapılar

Kompozit üstyapılar; deformasyon sonucunda onarım gerektiren rijit üstyapıların bitümlü sıcak karışım kullanılarak onarılması veya deformasyona uğramış esnek üstyapıların beton kullanılarak güçlendirilmesi ve yarı rijit üstyapı olarak da bilinen üstyapı çeşididir.

Rijit üstyapılarda, bitümlü sıcak karışım kullanımı ile yolun deforme olmuş kısımları onarılır, dayanıklılığı sağlanır ayrıca bitüm ile yol yüzeyi düzeltilerek trafiğe uygun hale getirilir. Esnek üstyapılarda, beton kullanımı ile yolun deforme sonucu zayıflayan kısımları güçlendirilir, taşıma kapasitesi ve ağır yük taşıma performansı artırılır ayrıca altyapısı beton takviyeli panellerle güçlendirilerek yolun dayanıklılık ve hizmet ömrünün uzaması sağlanır (Şimşek, 2024).

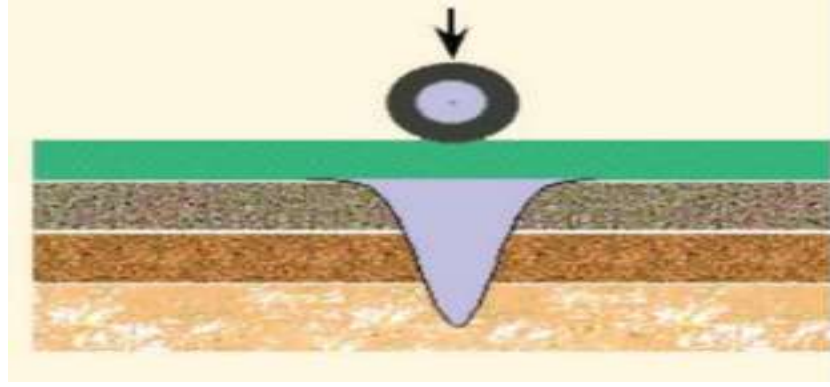
3.1.2.3. Esnek üstyapılar

Esnek üstyapılar; tesviye yüzeyi ile temas halinde olup trafik yüklerini, Şekil 3.4'te görüldüğü gibi kaplama, temel ve alt temel tabakaları yoluyla taban zeminine dağıtan, bağlayıcı malzeme olarak bitüm kullanılan üstyapı çeşididir. Alttan üste doğru çıktıkça daha kaliteli malzemelerden oluşmaktadır. Ayrıca, stabilitesi agrega bağlanmasına, dane sürtünmesine ve kohezyona bağlıdır (Atıcı, 2022).



Şekil 3.4. Esnek kaplama tabakaları

Esnek üstyapılarda, en üstteki tabakaya uygulanan trafik yükleri Şekil 3.5'te görüldüğü gibi sırasıyla temel tabakaya, alt temel tabakaya ve altyapıya yayıldıktan sonra altyapıdan doğal zemine aktarılmaktadır. Trafik yüklerinin katmanlar arasındaki aktarımında her katman çok önemlidir. Tabakaların kalınlıkları karşıladıkları yük miktarı ve zeminin karakteristik özelliklerine göre belirlenmektedir (Şimşek, 2024).

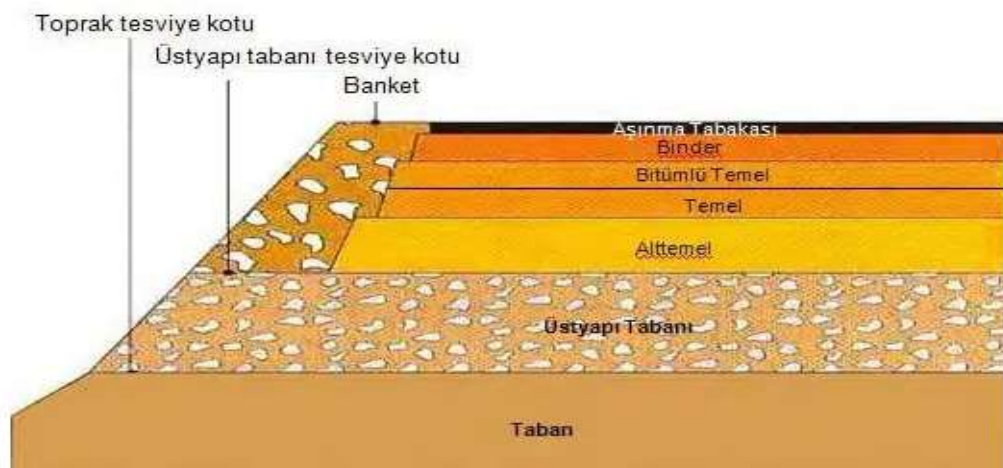


Şekil 3.5. Esnek kaplamada yük dağılımı (Yeğinoğlu, 2009)

3.2. Esnek Üstyapı

Günümüzde, dünya genelinde en yaygın kullanılan üstyapı çeşidi birçok avantajından dolayı esnek üstyapıdır. Amerika’da yolların yaklaşık %94’ü, Avrupa’ da yolların yaklaşık %95’i ve ülkemizdeki yolların %90’ dan fazlası esnek üstyapılardan oluşmaktadır (Başkan, 2020; Huang vd., 2022; Araz vd., 2023).

Esnek üstyapı; sıkıştırılmış taban zemini üzerinde gerektiğinde zemin ıslahı yapılarak ve seçme malzeme tabakası yapılarak, oluşturulan üstyapı tabanı üzerine sırasıyla Şekil 3.6’ da görüldüğü gibi alt temel tabakası (granüler malzeme), temel tabakası (asfalt betonu veya granüler malzeme), son olarak bitümlü temel kaplamasını oluşturan binder tabakası ve aşınma tabakasından oluşmaktadır (Atıcı, 2022).



Şekil 3.6. Esnek üstyapı tipik tabakaları

3.2.1. Esnek üstyapı tabakaları

Esnek yol kaplama tabakalarının fonksiyonları ve amaçları aşağıda anlatılmıştır (Üstünkol, 2006; Karakaş, 2014).

Sıkıştırılmış zemin; kaplamanın üzerine yapılacağı zeminin sıkıştırılması ile zeminin daha stabil olmasını sağlayan tabakadır. Bitkisel toprağın kazılıp atılması ve zeminin gevşetilip sıkıştırılmasıdır.

Zemin ıslahı; yolun oturacağı zeminin taşıma gücünü artırmak, suyun etkisi ile taşıma gücünde oluşan değişimleri azaltmak, don duyarlılığını azaltmak, oturmaları en az seviyeye indirmek için zeminlerin iyileştirilmesi yani ıslahıdır.

Seçme malzeme tabakası; yolun oturacağı zeminin taşıma gücünün çok düşük olması durumunda oturma, şişme, kabarma gibi olayların yaşanmaması için zemin kaldırılıp atılarak yerine uygun özelliklere sahip bir seçme malzemenin konularak sıkıştırılmasıdır.

Alt temel tabakası; tesviye yüzeyi üzerine serilen, trafik yüklerinin tabana yayılmasını sağlayan, zeminde; su, don kabarması, şişme ve büzülme etkilerine karşı direnç gösteren tabakadır. Alt temel tabakası, üstündeki tabakalara kıyasla daha küçük oranlarda gerilmeye maruz kalacağı için daha az kalitede ama dren kabiliyeti fazla ve yeterli derecede stabil olan granülerden malzemeler ile yapılmalıdır.

Temel tabakası; alt temel tabakası üzerine serilen, kaplama ve banketlere temel oluşturmak için granüler malzemelerden bağlayıcılı ve bağlayıcısız olacak şekilde farklı kalınlıklarda ve farklı tabakalar şeklinde yapılan, üstyapının yük taşıma kabiliyetini artıran, drenajı sağlayan, don etkilerine karşı direnç gösteren tabakadır.

Bitüm kaplama tabakası; temel tabakası üzerine yapılan, esnek kaplamanın en üst tabakasını oluşturan, trafik yüklerine maruz kalan ve trafik yüklerinin sebep olduğu basınç ve çekme gerilmelerinin en fazla olduğu, taşıtlara sürüş konforu ve emniyeti sağlamak amacıyla yapılan katmandır. Bu yüzden elastisite modülü diğer tabakalara kıyasla daha fazla olmaktadır. Kaplama tabakaları su etkisine karşı geçirimsizlik sağlayarak yolda bozulmaların önüne geçmesiyle beraber yaz mevsiminde tozdan, kış mevsiminde ise çamurdan koruyarak yolun daha konforlu olmasını sağlamaktadır.

Kaplama tabakası kalınlığı arttıkça direnç artar ve yüklerin büyük bir kısmını karşılayarak temel ve alt temele aktarılan gerilmeleri azaltmaktadır. Kaplama tabakası yolun standardına göre farklılık göstermektedir. Kaplama tabakası, yüksek standartlara sahip yollar için aşınma ve binder tabakaları birlikte kullanılıp BSK ile yüksek kalitede yapılırken, düşük standartlara sahip yollarda tek veya çift katlı sathi kaplama olacak şekilde yapılmaktadır.

Binder tabakası; bitüm kaplama tabakası üzerine yapılan, aşınma tabakası ile üstyapının kaplama tabakasını oluşturan ve aşınma tabakasını doğrudan etkileyen tekerlek yüklerini temel tabakasına yayarak aktaran tabakadır.

Aşınma tabakası; binder tabakası üzerine yapılan, en üstte olacak şekilde tekerleklerin temas edeceğinden trafik ve çevre etkilerinin doğrudan etki ettiği son tabakadır. Maruz kaldığı yüklere karşı daha stabil ve durabil olabilmesi ayrıca trafik yüklerinden dolayı oluşan gerilmelere karşı direncinin artması için yüksek dayanıma magmatik kayalardan elde edilen kırma taşların kullanılması tercih edilmektedir. Bitümlü tabakalara uygulanan deneyler ve uygulama şartları binder tabakası ve aşınma tabakası için de aynıdır. Fakat karayolları teknik şartnamedeki gradasyon limitleri farklıdır.

3.2.2. Esnek üstyapı avantaj ve dezavantajları

Esnek üstyapıların, rijit üstyapılara göre avantajları ve dezavantajları aşağıda verilmiştir (Başkan, 2020; Huang vd., 2022; Araz vd., 2023).

Esnek üstyapıların, rijit üstyapılara göre avantajları;

- Esnek üstyapılar, yapısal olarak elastik olduğundan ve deformasyon direnci yüksek olduğundan trafik yüklerini tabana yayarak aktarıp yolun hizmet ömrünü artırmaktadır.
- Hava koşulları etkisine karşı yüksek sürtünme direncine sahip olduğundan kaza riskini minimum seviyeye indirerek, bitümlü yolların daha güvenilir olmasını sağlamaktadır.
- Bitüm yüzeyinin düz olmasından dolayı sürüş konforu artmakta ve gürültü azalmaktadır. Bu yüzden yol daha konforlu olmaktadır.

- Bitüm, beton gibi reaktif özellik göstermediğinden asit ve sülfatlara karşı daha dirençli olmakta ve diğer malzemelerle reaksiyona girmemektedir.
- Esnek kaplamalı yollar geri dönüştürülebilmektedir.
- Bakım-onarım süresi daha kısa, daha kolay ve kademeli yapılabilmekte dolayısıyla asfaltın serim ve sıkıştırma işleminden birkaç saat sonra trafiğe açıldığı için yolun trafiğe kapanma süresi azalmaktadır.
- Yapım maliyeti düşük olduğundan daha ekonomik olmaktadır.

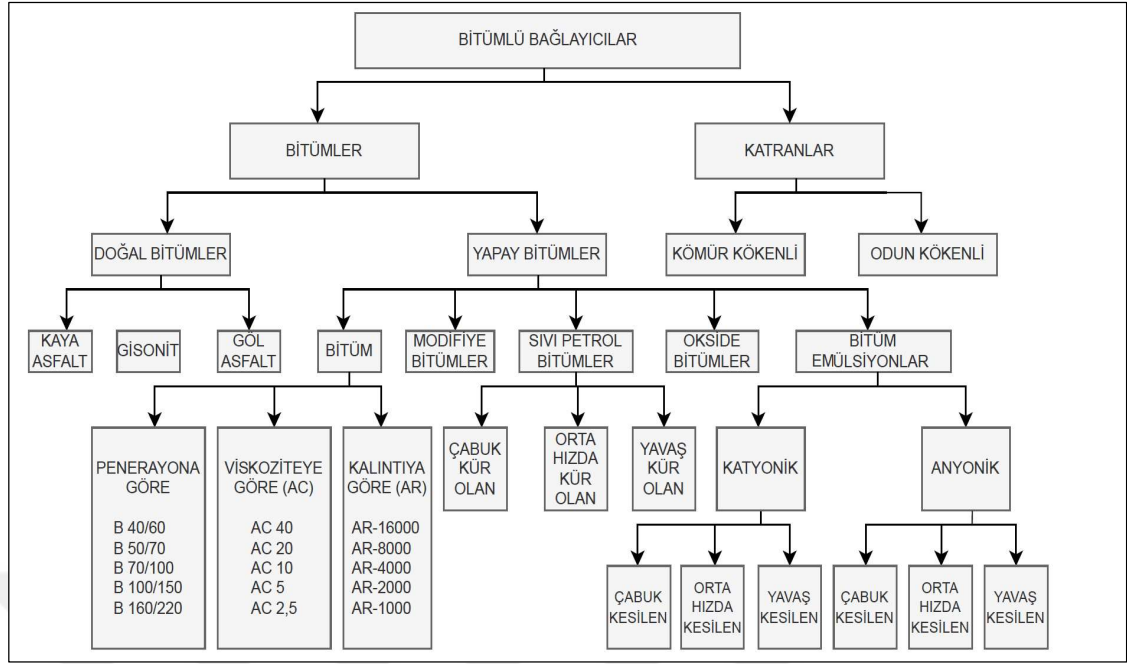
Esnek üstyapıların, rijit üstyapılara göre dezavantajları;

- Rijit üstyapılara göre daha çok bakım-onarım gerektirdiğinden bakım-onarım maliyeti fazla olmaktadır.
- Esnek üstyapılarda sıcaklık önemli olduğundan iklim şartlarının kötü olması durumunda karışımın plentten çıkış sıcaklığının korunamaması, serme ve sıkıştırma işlemlerin kalitesini olumsuz etkileyebilmektedir.
- Bitüm karışımının, rutubeti fazla olan zeminler üstüne serimi sakıncalı olmaktadır.
- Bitüm karışımında kullanılan agregaların kurutulma ve ısıtılma işlemleri sırasında çevre kirliliği olmaktadır.

Fakat katkı kullanımı ile maliyetin minimum seviyeye indirilmesi, yapımının uygun iklim şartlarında yapılması, rutubetsiz zemin seçilmesi ve çevre kirliliğini önlemek için çeşitli önlemler alınması ile bu dezavantajların ortadan kaldırılması mümkündür.

3.3. Bitümlü Bağlayıcılar

Bitümlü bağlayıcıların, bitümler ve katranlar olacak şekilde iki çeşidi vardır. Bitümlü bağlayıcıların sınıflandırılması Şekil 3.7’de gösterilen akış diyagramı ile sunulmuştur. Bitümlü bağlayıcılar sıvı hal, yarı katı hal ve katı halde olabilirler ayrıca yarı katı hal ve katı haldeki bağlayıcılara ısı uygulanarak sıvı hale getirilebilir.



Şekil 3.7. Bitümlü bağlayıcıların sınıflandırılması (Yüknü vd., 2021)

3.3.1. Bitümlü bağlayıcılara uygulanan deneyler

Bitümlü bağlayıcılara çoğunlukla uygulanan deneyler standartları ile aşağıda verilmiştir (Orhan, 2012; Yüknü vd., 2021):

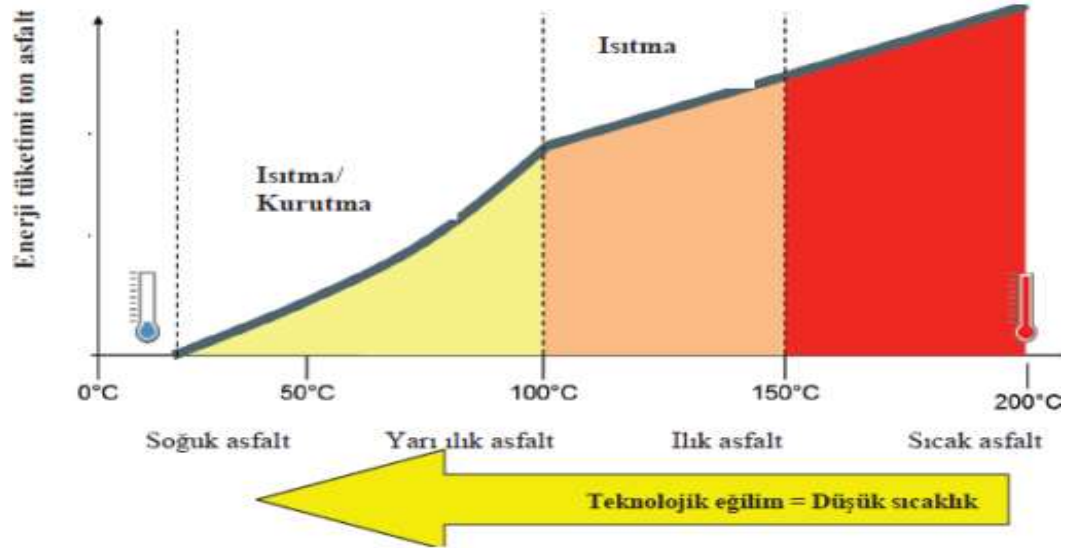
- Bitümlü Bağlayıcılar- Numune Alma (TS EN 58)
- Penetrasyon Deneyi (TS EN 1426, ASTM D5)
- Yumuşama Noktası Deneyi (TS EN 1427, ASTM D36)
- Parlama Noktası Deneyi (Cleveland Açık Kap) (TS EN 22719, TS 1171)
- Tag Kapalı Kap Cihazı ile Parlama Noktası Deneyi (TS 1171)
- Dönmeli İnce Film Etüvü Deneyi (RTFOT) (TS EN 12607-1)
- İnce Film Halinde Isıtma Kaybı Deneyi (TFOT) (TS EN 12607-2)
- Basınçlı Yaşlandırma Kabı (PAV) (AASHTO R 28)
- Kuvvet Ölçümlü Düktilite Deneyi (TS EN 12589)
- Elastik Geri Dönme Deneyi (TS EN 13398)
- Özgül Ağırlık Deneyi (TS 1087)
- Viskozite Deneyi (TS 117)
- Brookfield Viskozite Deneyi (ASTM D 4402)
- Fraass Kırılma Noktası Tayini Deneyi (TS EN 12593)

- Çözünürlük Tayini Deneyi (TS EN 12592)
- Kül Tayini Deneyi (TS EN ISO 6245)
- Bitümün Leke Bırakma Eğiliminin Tayini Deneyi (TS EN 13301)
- Modifiye Bitümlere Uygulanan Deneyler (TS EN 14023)

3.3.2. Bitümlü bağlayıcıların üretim sıcaklığına göre uygulamaları

Esnek üstyapıların en iyi performansı gösterebilmesi ve yolun hizmet ömrünün uzaması için malzemelerin seçimi, miktarı, kalitesi, tasarımı, yapılacağı yerin şartları ve kaplamanın üretim sıcaklığına göre uygulama şekli çok dikkat edilmesi gereken konulardır. Bitümlü bağlayıcı, üretim sıcaklığına göre Şekil 3.8’de görüldüğü gibi soğuk, yarı ılık, ılık ve sıcak karışım gibi çeşitli uygulamaları ile avantaj sağlamaktadır.

Üretim sıcaklığına göre; 150-180°C arası sıcaklıkta üretilen karışımlar bitümlü sıcak karışım (BSK), 100-150°C arası sıcaklıkta üretilen karışımlar ılık karışım asfalt (IKA), 70-100°C arası sıcaklıkta üretilen karışımlar yarı ılık asfalt karışım ve daha düşük sıcaklıklarda üretilen karışımlar ise soğuk asfalt karışım olarak sınıflandırılırlar (ASMÜD, 2024).



Şekil 3.8. Bitümlü bağlayıcıların üretim sıcaklık sınıflandırması (ASMÜD, 2024)

3.4. Bitümlü Sıcak Karışımlar (BSK)

Karayolu esnek üstyapısını oluşturan BSK, 150-180°C sıcaklık aralığında belirlenen sıcaklıkta ısıtılmış agrega karışımı (uygun gradasyona göre ayarlanmış) ile ısıtılarak akışkan duruma getirilmiş bitümün asfalt plentinde homojen bir şekilde karıştırılması ve yola serilip sıkıştırılmasıyla elde edilmektedir. Bu karışım iki farklı yöntem ile yapılmaktadır. Bu yöntemler Marshall tasarım yöntemi ve Superpave yöntemidir. Ülkemizde, Superpave yönteminin kullanımı yok denecek kadar azdır, bu yüzden BSK tasarımında genellikle Marshall tasarım yöntemi kullanılmaktadır.

3.4.1. Bitümlü sıcak karışımların özellikleri

Karayollarının yüksek performans gösterebilmeleri ve hizmet ömürlerinin artması için bitümlü sıcak karışımların aşağıda sıralanan özelliklere sahip olması gerekmektedir (Tunç, 2004b).

3.4.1.1. Stabilité

Stabilite, bitümlü sıcak karışım kullanılarak yapılan yol kaplamalarının maruz kaldığı trafik yüklerinden dolayı oluşan statik ve dinamik yüklerin etkisiyle meydana gelen deformasyona (şekil değiştirme) karşı gösterilen dirençtir. Yük altında oluşan deformasyon, geçici (elastik) deformasyon ve kalıcı (plastik) deformasyon olacak şekilde iki çeşittir. Kaplamanın stabilitesi düşük olduğunda trafik yükleri altında deformasyon olma ihtimali artıyor. Deformasyonun geçici kısmı az, kalıcı kısmı fazladır. Stabilité çok yüksek olduğunda ise rijitliğin artmasıyla beraber yüksek sıcaklıktaki deformasyon azalır, düşük sıcaklıkta ise sert olması nedeniyle maruz kaldıkları gerilmeler karşısında esnek davranmadıkları için çatlak oluşma ihtimali artar ayrıca deformasyonun geçici kısmı fazla iken kalıcı kısmı azdır. Sadece kalıcı deformasyon oluşması durumunda ise stabilite özelliğinden bahsedilemez. Bu yüzden karayollarında çok düşük stabilite istenmediği gibi aşırı yüksek stabilite de istenmez ancak stabilite trafik yüklerini karşılayacak kadar yüksek olmalıdır. Bitümlü sıcak karışımların uygulanacağı yerin iklim ve trafik parametreleri göz önünde bulundurularak yüksek stabiliteye sahip kaplama istendiğinde penetrasyonu düşük bitümlü bağlayıcı kullanılmalıdır (Şiş, 2000; Tunç, 2004b).

3.4.1.2. Durabilite (dayanıklık)

Durabilite, bitümlü sıcak karışım kullanılarak yapılan yol kaplamalarının trafik, hava, su ve sıcaklık değişikliği gibi çevre etkilerine karşı gösterilen dirençtir veya kaplamanın aşınma, kabarma, soyulma ve oksidasyon etkilerine karşı dayanıklı davranmasıdır. Trafik ve çevrenin etkisi ile bitümde sertleşme ve yaşlanma, agregada kırılma ve ufalanma ve agrega ile bitümün arasındaki bağın zayıflayarak agreganın bitümden ayrılması gibi olumsuzlukların olmaması için yoğun gradasyonlu, dayanıklı ve kırmataş agregalar kullanılmalıdır ayrıca penetrasyon derecesi düşük bitümden daha fazla oranda kullanılıp kaplamanın boşluk oranını en aza indirerek kaplamanın durabilitesi artırılır (Tunç, 2004b).

3.4.1.3. Rijitlik

Rijitlik, bitümlü sıcak karışımında yükleme süresinin ve ısının etkisi ile meydana gelen gerilme ve deformasyon arasındaki bağlantıyı tanımlar. Yükleme süresinin azalması, ısının azalması, yükleme hızının artması, bitümün viskozitesinin ve penetrasyonunun artması, BSK'nın yoğunluğunun artması ile malzemenin rijitliği artar (Tunç, 2004b).

BSK'lar, termoplastik ve viskoelastik malzemelerdir ve mekanik özelliklerinin belirlenmesi için "Rijitlik Modülü" kullanılır. Rijitlik modülü, elastik olan malzemelerin elastikiyet modülüne benzer olmakla birlikte ısıya ve yükleme hızına bağlı olarak aşağıda verilen (3.1) formülü ile hesaplanır (Tunç, 2007) .

$$S_{(t,T)} = \sigma/\varepsilon \quad (3.1)$$

Formüldeki; S değeri rijitlik modülünü, t değeri yükleme süresini, T değeri ısıyı, σ değeri gerilmeyi, ε değeri ise deformasyonu göstermektedir.

3.4.1.4. Esneklik

Esneklik, yolun üstyapısını oluşturan alt temel tabakası ve temel tabakasında meydana gelen oturmalarla karşı kaplamanın çatlak oluşmadan eğilebilme yeteneğidir. BSK'nın düşük sıcaklıkta yeterince esnek olması, büzülme çatlaklarını engelleyerek kaplamanın hizmet ömrünü artırır ayrıca oluşan oturmaların sebep olduğu gerilmeleri karşılar.

Bitümün miktarı, penetrasyon derecesi, ısı altında genleşme derecesi ve filler oranı kaplamanın esneklik özelliği üzerinde etkilidir. Esnek bir kaplama için açık gradasyonlu agrega, daha yüksek oranda bitüm ayrıca yaz mevsiminde kıvamını koruyan, kış mevsiminde ise kırılğan olmayan, trafik ve çevre etkilerine karşı yorulma dayanıklılığı fazla olan bitüm kullanılmalıdır (Umar ve Ağar, 1991; Tunç, 2004b).

3.4.1.5. İşlenebilirlik

İşlenebilirlik, bitümlü sıcak karışımın karıştırma, serilme ve sıkıştırma işlemleri sırasında uygun kıvamda ve üniformlukta olmasıdır. Agreganın; gradasyon, maksimum dane boyutu, şekil ve yüzey yapısı ayrıca bitümün oranı işlenebilirlik özelliği üzerinde çok etkilidir. Özellikle No.10 eleği altındaki agregaların şekilleri BSK üzerinde çok etkilidir. Kum çeşitlerinden köşeli biçiminde olan kum daneleri ve kırmataş parçaları BSK'nın stabilite özelliğini artırırken, yuvarlak biçiminde olan kum daneleri işlenebilirlik özelliğini artırır. Karışımda kaba agrega ve filler oranı fazla olduğunda işlenebilirlik zorlaşmaktadır. BSK'da bitüm oranının az olduğu durumlarda iyi agrega kullanılması, uygun gradasyon kullanılması ve silindirme işleminin yeterince yapılarak sıkışmanın iyice yapılması, kaplamadaki yoğunluğun istenilen pratiklikte olması için yeterli olmaz bu yüzden bitüm oranı işlenebilirlik üzerindeki etkisi çok büyüktür. Karışımın işlenebilirliği arttıkça sıkışma kolaylığı da artar, fakat işlenebilirlik özelliği iyi olan karışımlar yumuşak olmaları sebebiyle trafik yüklerinin altında oluklanarak deformasyona uğramaları da kolaylaşır (Umar ve Ağar, 1991; Tunç, 2004b; Cüre, 2005).

3.4.1.6. Geçirimsizlik

Geçirimsizlik, bitümlü karışımın içerisine havanın ve suyun girmesine karşı gösterilen dirençtir. Karışım içindeki hava boşluklarının oranı ile ilgilidir. Bitümlü sıcak karışım uygulamalı kaplamadaki, hava boşlukları yüzdesi ile boşlukların birbiri ile olan bağlantısı, bitümlü kaplamanın yüzeyindeki havanın, suyun ve gazların geçmesini sağlayan koridorlar oluştururlar. Bitümlü sıcak karışımlardan yapılan kaplama tabakalarının, alt tabakalara su geçiremeyecek seviyede geçirimsiz olması gerekmektedir. Geçirimsizlik; bitüm oranının artması, karışımın iyi sıkıştırılması, agrega gradasyonunun iyi olması, karışım yoğunluğunun artması, boşluk oranının azalmasına bağlı olarak artar.

Bitümün hava sıcaklığının fazla olması durumunda genişlemesinden dolayı terleme yoluyla veya kuma yoluyla kaplamanın dışına çıkmasını engellemek, trafik yükleri altında sıkışmanın sağlanması ile parçalanmayı engellemek için biraz boşluk oranı olmalıdır. Ancak karışımın içsel sürtünme açısının düşmesini yavaşlatmak ve kaplamanın geçirimsizliğini artırıp bitümün yaşlanmasını geciktirmek için boşluk oranı kısıtlanmalıdır (Ilıcalı vd., 2001; Tunç, 2004b).

3.4.1.7. Yorulma mukavemeti

Yorulma mukavemeti, tekrar eden yüklerin etkisi ile kaplamada yorulma çatlakları oluşuncaya kadar eğilmeye (kalıcı deformasyon oluşmasına) izin verme yeteneği olup, bitümlü sıcak karışımların taşıyabildiği maksimum çekme mukavemetine ulaşmadan, etkiyen trafik yüklerinin maksimum tekrar sayısına karşılık gelen mukavemet değeridir. Bitümlü sıcak karışımın rijitliğinin ve elastikiyetinin artması, kaplamanın kalınlığının artması, eğilme gerilmesinin azalması, bitüm oranının ve penetrasyonunun artması, gradasyon ve yoğunluğun artması durumlarında yorulma mukavemeti artar. Yetersiz sıkıştırma ve dizayn hataları sebebi ile fazla hava boşluğuna sahip kaplamaların ve yaşlanma sonucunda sertleşen kaplamaların yorulma mukavemeti azalmaktadır (Balta, 2004; Tunç, 2004b).

3.4.1.8. Kayma mukavemeti

Kayma mukavemeti, taşıtların kaplama üstünde güvenli bir şekilde hareket etmesi, frenleme esnasında emniyetli bir şekilde durması, kurplarda merkezkaç kuvveti etkisi ile yoldan savrulmaması için kaplama yüzeyi ile teker arasındaki sürtünme mukavemeti veya kaplamanın özellikle ıslak olduğu durumlarda taşıtların kaymasına karşı koyduğu dirençtir. Kayma mukavemeti karışımda kullanılan agreganın aşınma direnci, bitüm oranı ve boşluk yüzdesine bağlıdır. Cilalanma dayanımı yüksek, kırmataş ve pürüzlü agregalar kullanılması, bitüm oranının az olması kayma mukavemetini artırır. Kaplamanın yüzey pürüzlülüğünün artması kayma direncini artırır ama sürüş konforunu azaltır (Umar ve Açar, 1991; Tunç, 2004b).

3.5. BSK Uygulamalı Esnek Kaplamalarda Meydana Gelen Bozulmalar

BSK kullanılarak yapılan esnek kaplamalar üretilirken; kötü malzeme seçilmesi, agrega gradasyonunun ve bitüm oranının uygun seçilmemesi, alt temel ve temelin dayanıklı yapılmaması, kaplama kalınlığının uygun hazırlanmaması, sıkıştırmanın iyi yapılmaması, hizmete başladıktan sonra ise trafik etkisi, iklim ve çevre etkilerinden dolayı kaplamada genel olarak deformasyonlar, çatlaklar ve ayrışmalar olacak şekilde bozulmalar meydana gelmektedir. Meydana gelen bu bozulmalar trafik güvenliğini ve konforunu olumsuz etkilemektedirler. Kaplamalarda meydana gelen bozulmalar detaylıca anlatılmıştır (Tunç, 2004a, 2004b, 2007).

3.5.1. Deformasyonlar

Deformasyonlar, BSK uygulaması yapılan esnek üstyapı kaplamalarının serilme ve sıkıştırma işlemlerinden belirli bir zaman sonra yol ekseni boyunca ya da belirli bölgelerde kaplamanın yüzeyindeki kotun değişmesinden kaynaklı meydana gelen kalıcı deformasyonlar yani kalıcı şekil değişiklikleri olup, karayollarında en çok görülen yapısal bozulma çeşididir (Tunç, 2004a; Kutluhan, 2008).

Bu bozulma türünün bazı nedenleri:

- Alt tabakalarda ve zeminde, hacim değişikliklerinin çok fazla olması.
- Üstyapı tabakalarının kalınlıklarının yetersiz olması.
- Kaplama tabakalarının iyi sıkıştırılmaması.
- Drenajın yetersiz yapılması.
- Bitümlü sıcak karışımın stabilitesinin düşük olması.
- Kayma mukavemetinin düşük olması.
- Bağlayıcının (bitümün) fazla kullanılması.
- Bitümün penetrasyonunun yüksek olması.
- Fillerin fazla kullanılması.
- Agreganın cilalı ve yuvarlak olup kenetlenme dirençlerinin düşük olması.
- Yağmur, yüksek sıcaklık, donma-çözünme gibi iklim koşulları ve çevre etkilerinin olması.
- Trafik hacminin ve yükünün çok fazla olması.

Deformasyonlar, karayollarının emniyetini ve konforunu olumsuz etkiledikleri için bölgesel tamir-onarım veya takviye tabaka yapılmalıdır. Deformasyon çeşitleri üniform olmayan yüzey bozuklukları, tekerlek izi, lastik deseni, bölgesel çökme, ondülasyonlar, yığılmalar ve kabarmalar olup aşağıda detaylıca anlatılmıştır.

3.5.1.1. Üniform olmayan (düzensiz) yüzey bozuklukları

Deformasyon çeşidi olan üniform olmayan yüzey bozuklukları, yolun enine veya boyuna yönünde dalgalı ve pürüzlü biçimde görünen şekil değişiklikleridir. Zeminde ve temel tabakalarında meydana gelen oturmalar, zeminin dayanıksız olması, temel tabakasının stabilitesinin düşük olması, drenajın yeterli yapılmaması, kaplama kalınlığının yetersiz olması gibi nedenlerden kaynaklanan bozulmalardır. Bu bozulma yol eksenine boyunca veya büyük bir kısmında meydana gelir, dolayısıyla bölgesel tamir-onarım ile düzeltilmesi zordur (Tunç, 2007) .



Şekil 3.9. Esnek kaplamada oluşan üniform olmayan yüzey bozukluğu

3.5.1.2. Tekerlek izi

Tekerlek izi deformasyonu, yolun üstünden geçen taşıtların tekerleklerinin yol ile temas ettiği kısımlarda yol eksenine boyunca meydana gelen yer çekimi doğrultusundaki kalıcı bozulmalardır. Genellikle trafik yüklerinin ağır olduğu yollarda, ağır araçların düşük hızda hareket etmelerinden, sıcaklığın yüksek olmasından, temel tabakasının kalınlığının yeterli olmamasından, bitüm ve fillerin çok fazla kullanılmasından, bitümün penetrasyonunun yüksek olmasından kaynaklanan bozulmalardır. Tekerlek izi bozulmaları hızlı araçlar için güveni ve tüm taşıtlar için konforu olumsuz etkilemektedir.

Yağış sonrası suların oluklarda birikmesi ile tehlike oluşturmaktadır. Ayrıca bu sular kaplamanın içine nüfus eder ve agregaların soyulmasına, asfaltın oksidasyonunun artmasına sebep olabileceğinden diğer stabilite bozukluklarını başlatır veya hızlandırır. Bu bozulmanın onarımı çok zordur (Tunç, 2004a, 2007)



Şekil 3.10. Esnek kaplamada oluşan tekerlek izi deformasyonu

3.5.1.3. Lastik deseni

Lastik deseni, sıcak iklime sahip bölgelerde ve ağır trafik hacminin fazla olduğu yol kesimlerinde ağır taşıtların lastik yüzeylerinde bulunan yiv (oluk) deseninin, kaplamanın yüzeyinde iz bırakması şeklinde oluşan yüzeysel deformasyonlardır. Trafik yüklerinin ağır olması, tekerrür sayısının fazla olması, stabilitenin düşük olması, kusmanın fazla olması, ısının yüksek olması, yüksek penetrasyonlu bitüm kullanılması gibi nedenlerden meydana gelir. Lastik deseninin derinliğinin fazla olması, biriken civar sularının aniden soğuması ile yüzeyleri kaygan hale getirmesi sebebiyle sürüş konforunu ve emniyeti olumsuz etkilemektedirler. Ağır taşıt trafiğine maruz kalan bölgelerde düşük penetrasyona sahip bitüm kullanılarak bu deformasyonlar engellenebilmektedir (Umar ve Ağar, 1991; Tunç, 2007).



Şekil 3.11. Esnek kaplamada oluşan lastik deseni

3.5.1.4. Bölgesel çökme (oturmalar)

Deformasyon çeşidi olan bölgesel çökme bozulmaları diğer adıyla oturmalar, yolun belli bir bölümünde 0,5-2,0 m yarıçaplı daireye yakın boyutta oluşan çökmelerdir. Sıkıştırmanın üniform ve yeterince yapılmaması, kaplamada su içeriğinin çok olması, aşırı segregasyon (ayrışma) gibi nedenlerden kaynaklanan bozulmalardır. Bu bozulma belirli bir bölgede olduğu için onarılması mümkündür. Yolun belli kısımlarında oluştuklarından dolayı deforme olmuş kısımlar kazılıp atılır ve bitümlü karışım ile doldurularak sıkıştırılır böylece onarılmış olurlar (Tunç, 2007; Sağlık ve Güngör, 2008).



Şekil 3.12. Esnek kaplamada oluşan bölgesel çökme

3.5.1.5. Ondülasyonlar (dalgalanmalar)

Ondülasyonlar, trafik akışının olduğu doğrultuda kaplamada dalgayı benzeyen şekillerde oluşan bozulmalardır. Bitümlü sıcak karışımın yeterli stabiliteye sahip olmaması, kullanılan bitüm oranının fazla olması, bitüm penetrasyonunun yüksek olması, binder tabakasının yeterli kalınlıkta olmamasından kaynaklı oluşurlar. Bozulma yolun belli kısımlarında oluştuklarından dolayı deforme olmuş kısımlar kazılıp atılır ve bitümlü karışım ile doldurularak sıkıştırılır böylece onarılmış olurlar (Uluçaylı ve Yavuz, 2002).



Şekil 3.13. Esnek kaplamada oluşan dalgalanmalar

3.5.1.6. Yığılmalar

Yığılmalar, bitümlü kaplamanın üst kısmında yol eksenine dik ya da paralel olacak şekilde araçların lastiklerinin mekanik etkisi ile oluşan deformasyonlardır. Yüksek sıcaklık, yetersiz stabilite gibi nedenlerden kaynaklı oluşurlar. Düşük penetrasyonlu bitüm ve yüksek stabiliteli karışımlar kullanılarak engellenebilirler (Tunç, 2004b).



Şekil 3.14. Esnek kaplamada oluşan yığılmalar

3.5.1.7. Kabarmalar

Kabarmalar, zeminin veya üstyapının şişmesi ile oluşan deformasyon çeşididir. Dona duyarlı olan zeminlerde don derinliği ile kaplama kalınlığının eşit olduğu veya don derinliğinin kaplamanın kalınlığından daha fazla olduğu bölgelerde don kabarması meydana gelir böylece yol deforme olur. Bu yüzden dona duyarlı zeminlerde kaplamanın altına yeterli kalınlıkta dona duyarsız seçme malzeme tabakası konulmalıdır. Ayrıca zemin stabilizasyonu, drenaj gibi işlemlerle kabarma ve şişme engellenebilir (Uluçaylı ve Yavuz, 2002).



Şekil 3.15. Esnek kaplamada oluşan kabarmalar

3.5.2. Çatlamalar

Çatlamalar, bitümlü sıcak karışım uygulaması yapılan esnek kaplamaların üzerindeki trafik yükleri, çevre ve iklim etkilerinden kaynaklı, dingil yüklerinden dolayı kaplama tabakası altında meydana gelen gerilmelerin kaplama tabakasının mukavemetini aştığı zamanlarda değişik şekillerde, büyüklüklerde ve derinliklerde meydana gelen bozulmalardır. Çatlaklar, araçların ani hızlanması veya yavaşlaması ile ortaya çıkan yatay kuvvetlerin etkisi ile de oluşabilmektedirler. Çatlama çeşitleri; stabilite çatlakları, yorulma çatlakları, yansıma çatlakları, timsah sırtı çatlaklar, düşük sıcaklık çatlakları, kenar çatlakları, derz çatlakları, enine çatlaklar ve yüzey kayması çatlakları olup aşağıda detaylıca anlatılmıştır (Umar ve Ağar, 1991; Gençtürk, 2011).

3.5.2.1. Stabilite çatlakları

Stabilite çatlakları, trafik yüklerinin etkisiyle kaplamanın alt tabakasında oluşan çekme gerilmesinin, çekme mukavemetini aştığı durumda kaplamanın stabilitesinin yetersizliğinden dolayı alt tabakadan başlayıp üst tabakaya doğru oluşan bloklar halindeki yapısal çatlaklardır (Tunç, 2004a).



Şekil 3.16. Esnek kaplamada oluşan stabilite çatlakları

3.5.2.2. Yorulma çatlakları

Yorulma çatlakları, tekrar eden ağır trafik yüklerinin etkisiyle kaplamanın yorulma mukavemetinin aşıldığı durumlarda trafik hacmi ile ilişkili olarak teker izi yörüngesinde önce boyuna sonra enine oluşan çatlakların birbirine bağlanarak petek şeklinde oluşan çatlaklardır. Kaplamanın yorulma mukavemeti ve taşıt hacmi ile ilişkili olarak düşük, orta ve yüksek olacak şekilde farklı şiddetlerde meydana gelmektedirler (Brown vd., 2001).



Şekil 3.17. Esnek kaplamada oluşan yorulma çatlakları

3.5.2.3. Yansıma çatlakları

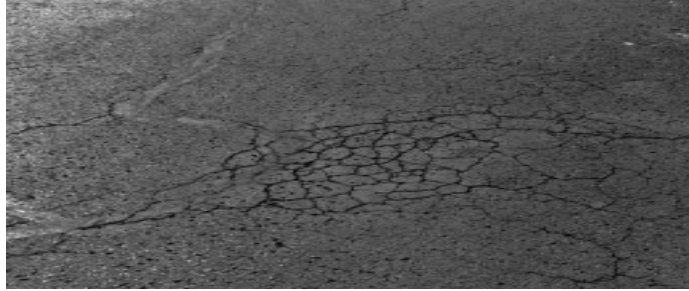
Yansıma çatlakları, zarar görmüş esnek kaplama tabakalarını onarmak için kaplama üzerine serilen takviye bitüm kaplamanın altındaki kaplamada trafik yüklerinin, sıcaklığın ve zemin hareketinin etkisiyle önceden oluşan ve takviye tabakasına yansıma yaparak geçen; köşegen, enine, boyuna veya bloklar halindeki çatlaklardır. Takviye tabakasının ve kaplamanın ince olması bu çatlak oluşumunu mümkün hale getirir. Bu yüzden takviye tabakası minimum 10 cm kalınlığında yapılırsa, takviye tabakası yapılmadan önce mevcut kaplamanın derz ve çatlakları onarılsa yansıma çatlakları önlenmiş olur (Balta, 2004).



Şekil 3.18. Esnek kaplamada oluşan yansıma çatlakları

3.5.2.4. Timsah sırtı çatlaklar

Timsah sırtı çatlaklar, aşırı dingil yükü, yetersiz drenaj, stabil olmayan temel ve tabakalarda hacim değişikliği etkilerinden dolayı yorulma mukavemetinin aşılması durumunda kaplamanın tüm kesiminde veya belirli bir kısmında oturma şeklinde kümes teli, bal peteği veya timsah sırtı biçiminde farklı boyutlardaki bloklar halinde oluşan çatlaklardır (Morova, 2013).



Şekil 3.19. Esnek kaplamada oluşan timsah sırt çatlaklar

3.5.2.5. Düşük sıcaklık (büzülme) çatlakları

Büzülme çatlakları, tabakalardaki hacim değişiklikleri, soğuk hava şartlarında kaplamanın büzülmesi ve bitümün rijitleşerek ağır trafik yükleri altında gevrek davranması veya bitümün sertleşmesi ile rötre (büzülme) etkisiyle düzensiz şekilde dar açılı ve sivri köşeli, farklı boyut ve şekillerde olan büyük blokların yani poligonların bir araya gelmesi şeklinde timsah sırtı çatlaklara benzeyen yol eksenine dik çatlaklardır. Aslında bu çatlaklar, yüzeyde kılcal çatlaklar şeklinde başlar ve soğuma tekerrür sayısı ile ağır taşıt trafiğinin yoğunluğu ile zamanla derinliği artar. Büzülme çatlaklarının, timsah sırtı ve yorulma çatlaklardan farkı poligonların daha büyük olması ve çatlakların çıkış noktaları ile önceden oluşmuş çatlakların dik açı şeklinde olmasıdır. Çatlağın boyutu oluşum zamanı hakkında bilgi verirler bu yüzden en büyük çatlaklar en eski çatlaklardır. Düşük sıcaklık çatlakları termal çatlaklar olarak da adlandırılırlar (SHRP, 1993; Tunç, 2004b).



Şekil 3.20. Esnek kaplamada oluşan düşük sıcaklık çatlakları

3.5.2.6. Kenar çatlakları

Kenar çatlakları, drenajın yetersizliği, don kabarması, üstyapı ve banket arasındaki nem farkı (banketlerin aniden kurumması) etkilerinden dolayı banketlerin yanal desteğinin yetersiz olması durumunda, kaplamanın kenarlarından neredeyse 30 cm içeride ve yol eksenine paralel olarak kaplama kenarının yakınında, boyuna ve banket kenarına doğru enine dallanma biçiminde oluşan çatlaklardır. Bu bozulma türü kum ile karıştırılmış katbeg asfaltı ve BSK'larla yama yapılarak ihtiyaç duyulan koda getirilmesi ile onarılmaktadır (Taşdemir, 2003).



Şekil 3.21. Esnek kaplamada oluşan kenar çatlakları

3.5.2.7. Derz çatlakları

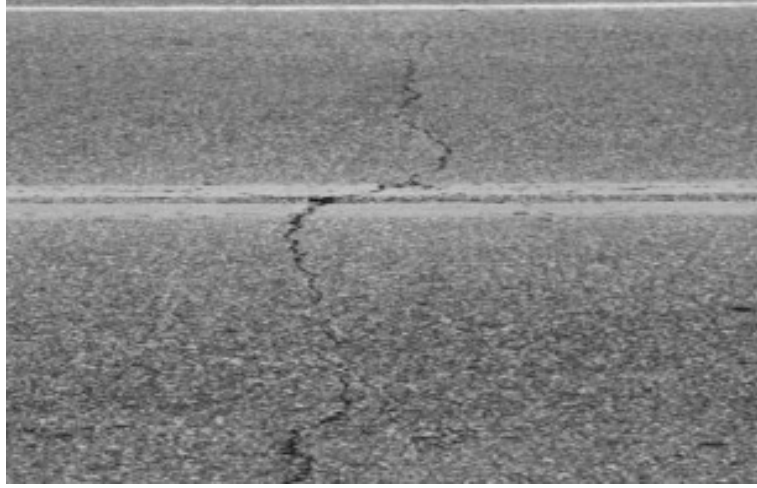
Derz çatlakları, yolun ikinci şeridinin dökümü anında birinci şeride, ihtiyacı karşılayabilecek miktarda bindirmenin yapılmaması gibi yapım hatalarından dolayı iki şerit arasında oluşan ve zamanla bunların birbirinden ayrılmasına yol açan çatlaklardır. Bu çatlaklar ayrıca kaplama tabakası ile banket arasında da oluşabilmektedir. Oluşan çatlak, geçirimsizliği azaltır ve ayrışmalara sebep olurlar (Umar ve Ağar, 1991).



Şekil 3.22. Esnek kaplamada oluşan derz çatlakları

3.5.2.8. Enine çatlaklar

Enine çatlaklar, üstyapı kalınlığının yetersiz olması, yetersiz drenaj, sıcaklığın ani düşmesi ile kaplamada meydana gelen gerilmeler gibi nedenlerden dolayı yol eksenine dik veya açısız olacak şekilde kılcal biçiminde nadiren oluşan çatlaklardır. Bu tarz çatlaklar, köprü ve drenaj benzeri sanat yapılarının olduğu bölgelerde daha çok oluşmaktadır (Umar ve Ağar, 1991; Tunç, 2004a).



Şekil 3.23. Esnek kaplamada oluşan enine çatlaklar

3.5.2.9. Yüzey kayması (öteleme) çatlakları

Yüzey kayması çatlakları, yüzey tabakasının tekerlek yüklerinden dolayı oluşan yatay kuvvetlerin etkisiyle alt tabaka üzerinden kayması, iki tabaka arasındaki yapışmanın yetersizliği, yapıştırıcının çok kullanılması, yapıştırılma sonrası tozlanma ve ıslanma etkileri sonucu yüzey tabakası ile alt tabakanın iyi yapışmamasından dolayı oluşan iç içe hilaller şeklinde olan parabolik çatlaklardır. Tabakanın kalın yapılması ve karışımın çekme direncinin iyi olması bu çatlakları azaltır (Umar ve Ağar, 1991).



Şekil 3.24. Esnek kaplama oluşan yüzey kayması çatlakları

3.5.3. Ayrışmalar

Ayrışmalar, karayolu üstyapısını oluşturan tabakadaki agrega danelerinin iklim, trafik gibi çevre ve hava koşullarının sebep olduğu mekanik etkiler ile kaplamadan kopup ayrılan bozulma çeşididir. Ayrışma bozulması çok görünen bir bozulmadır. Bu yüzden başladığında hemen önlenmezse trafik ve iklim etkileriyle zaman içerisinde artar dolayısıyla güvenlik ve konforu olumsuz etkiler ayrıca kaplamanın hizmet ömrünü kısaltır (Umar ve Ağar, 1991; Tunç, 2004b).

Ayrışma aşağıda sıralanan nedenlerin birkaçının aynı anda olması ve trafiğin mekanik etkisi ile başlar ve zamanla artar. Bu bozulma türünün bazı nedenleri:

- Bitümün mekanik etki ile kopması.
- Karışımın kalitesinin iyi olmaması (bitüm oranının az olması, filler oranının uygun ayarlanmaması, agreganın zayıf ve kirli olması).
- Karışımın homojen yapılmaması ve iyi sıkıştırılmaması.
- Adezyonun yetersiz olması.
- Kullanılan bitümün penetrasyonunun yüksek olması.
- Serim aşamasında segregasyon olması.
- Yüzey tabakasının yeterince kalın olmaması.
- Yüzey tabakasının alt tabakaya iyi yapışmaması.
- Drenajın yeterince yapılmaması.
- Kaplamanın nemli veya soğuk havalarda yapılması.
- Karışım hazırlanırken bitümün plent içerisinde fazla ısıtılması.

Ayrışma çeşitleri folluk tipi oyuklar, sökülmeler, tabaka halinde sökülmeler, soyulma, kayganlık, cilalanma ve kusma olup aşağıda detaylıca anlatılmıştır.

3.5.3.1. Folluk tipi oyuklar

Folluk tipi oyuklar, bitüm oranının az olması, filler oranının çok az ya da çok fazla olması, agreganın temiz olmaması, yüzey tabakasının ince olması, drenajın yeterince yapılmaması, sıkıştırma işleminin iyi yapılmaması gibi nedenlerden kaynaklanan, dairesel olarak 25-75 cm çapında olan çanak şeklinde folluğa benzeyen ayrışma çeşididir.

Bu tür bozulmalar kaliteli bitüm ve agrega kullanılarak, uygulamasında şartnameye uyarak, yeterli drenaj yapılarak ve yeterli sıkıştırma yapılarak önlenabilir (Tunç, 2004a).



Şekil 3.25. Esnek kaplamada oluşan folluk tipi oyuklar

3.5.3.2. Sökülmeler

Sökülmeler, sıkıştırma işleminin düzgün ve yeterli yapılmaması, bitümün az kullanılması, kaplama kalınlığının az olması, kirli agrega kullanılması, karışım esnasında bitümün çok fazla ısıtılması gibi nedenlerden dolayı bitümlü kaplamadaki agrega danelerinin arasındaki bağın yetersiz olmasından kaynaklı agregaların zamanla yüzeyden alta doğru veya kenardan içe doğru koparak yerinden çıkması (sökülme) olan ayrışma türüdür. Sökülmeler önce ince malzemelerde oluşarak küçük çukurlara yol açar sonrasında büyük parçaların kopması ile tabaklar halinde oluşur. Bu tür bozulmalar başladıktan hemen sonra koruyucu tabaka uygulaması yapılarak yavaşlatılabilir (Tunç, 2007).



Şekil 3.26. Esnek kaplamada oluşan sökülmeler

3.5.3.3. Tabaka halinde sökülmeler

Tabaka halinde sökülmeler, tabaka kalınlığının yetersiz olması, bağlayıcılığın az olması nedenlerinden ötürü derz çatlakları civarında oluşan ayrışma türüdür (Umar ve Ağar, 1991).

3.5.3.4. Soyulma

Soyulma, agregaları saran ince bitüm filminin trafik ve evre koşullarının mekanik etkisiyle agregalardan ayrılmasıdır.(Umar ve Ağar, 1991).



şekil 3.27. Esnek kaplamada oluşan soyulma

3.5.3.5. Kayganlık

Kayganlık, bitümlü kaplama tabakasında araçların sebep olduğu kuma ve aşındırma etkileri nedeni ile kayma direncinin azalması (sürtünme katsayısının düşmesi), dolayısıyla yüzeydeki agregadaanelerinin cilalanması ile oluşan ayrışma türüdür. Kaplama yüzeyinin ıslak olması durumunda araç trafiği ve yüksek hızda trafik akışı açısından güvenliği olumsuz etkileyen bozulma çeşididir (Umar ve Ağar, 1991).

3.5.3.6. Cilalanma

Cilalanma, aşınma oranı fazla olan agrega danelerinin araç trafiğinin neden olduğu aşındırma etkisi ile pürüzlülüklerini kaybederek oluşan aşındırma türüdür. Bu bozulmanın önlenmesi için araç trafiği yoğunluğuna uygun, aşınma oranı düşük, köşeli ve pürüzlü agregalar kullanılmalıdır (Tunç, 2004b).



Şekil 3.28. Esnek kaplamada oluşan cilalanma

3.5.3.7. Kusma (terleme)

Kusma, hava sıcaklığının yüksek olması, karışımda kullanılan bitüm oranının fazla olması, boşluk oranının az olması nedenlerinden dolayı bitümün sıcaklık etkisi ile yükselip yüzeye çıkması kaplama yüzeyinde kalın bir bitüm filmi oluşması ile meydana gelen ayrışma türüdür. Kusmanın olması ile kaplama yüzeyindeki agrega danelerinin bitüm filmi ile kaplanması sonucunda sürtünme katsayısı düşer, böylece kaplama yüzeyi kayganlaşır. Bu tür bozulmaları önlemek için bitüm ve boşluk oranlarının uygun seçilmesi ile önlenabilir (Tunç, 2004a).



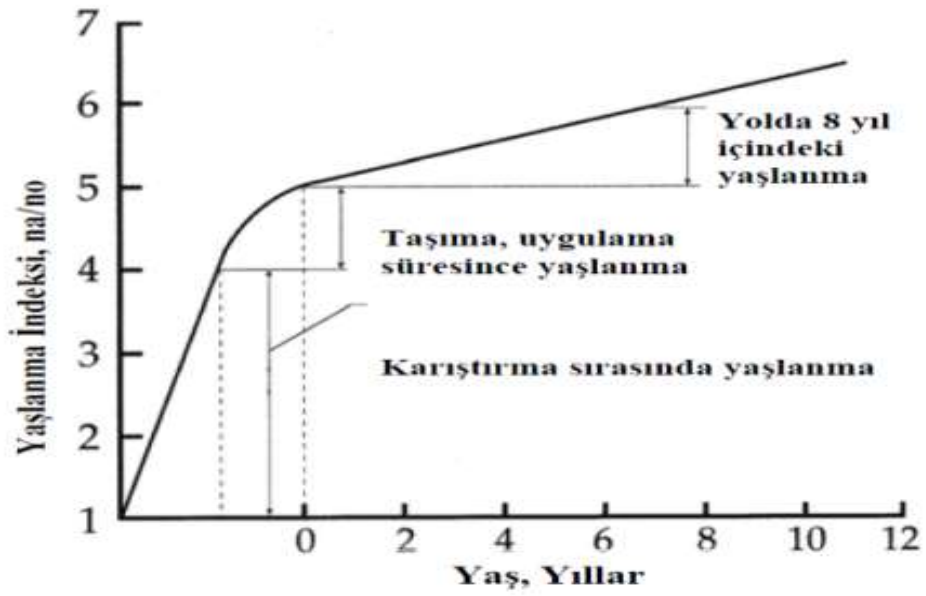
Şekil 3.29. Esnek kaplamada oluşan kusma

3.6. Bitümlü Sıcak Karışımlarda Adezyon, Kohezyon ve Yaşlanma

Bitümlü sıcak karışımlarda stabilite ve içsel sürtünme direnci agregaya, kohezyon bitüme, adezyon ise bitüm ve agregaya bağlıdır. Stabilite bitümün dayanıklılığıdır. İçsel sürtünme direnci, parçacıklar arasındaki sürtünme kuvveti olup maddenin viskozitesi (akıcılığı) ile ilgilidir. Kohezyon, bitümün kendi içindeki moleküler çekim gücü olup bitümün homojen bir yapı oluşturmasını sağlayan, karışımın stabilitesini artıran ve eksikliğinde kaplamada çatlak ve ayrışmalara sebep olup dayanıklılığı olumsuz etkileyen bir özelliktir. Adezyon, bitüm ile agrega danelerinin yapışma özelliği olup agrega ve bitümün kenetlenip trafik yükleri altında dağılmalarını önleyen ve eksikliğinde bağın zayıf olmasından kaynaklı kaplamanın dayanıklılığını ve ömrünü olumsuz etkileyen bir özelliktir (Tunç, 2004a).

Bitümlü sıcak karışımlar uygulamalı kaplamaların hizmet ömürleri boyunca maruz kaldıkları trafik yükleri, iklim şartları ve üretim hataları yolların düşük sıcaklık çatlakları, yorulma çatlakları, tekerlek izi gibi bozulmalara neden olurlar, hizmet ömrünü ve konforu azaltırlar. Bu olumsuzluklara karşı koyabilen, bağlayıcının performansını doğrudan etkileyen dayanıklılık özelliği sertleşmeye karşı gösterilen dirençtir. Bitümlü bağlayıcının, yukarıda bahsedilen nedenlerden dolayı sertleşmesi ve kırılgan hale gelmesi yaşlanma veya zamana bağlı yaşlanmadır (Bell vd., 1994).

Bitümde yaşlanma olayı, bitümün hazırlanma aşaması ve bitümün taşınma-uygulanma aşaması olmak üzere iki aşamadan oluşmaktadır. Bitüm hazırlanma aşamasındaki yaşlanma, üretim tesislerinde bitümün sıcak agregaya ilave edilip karışımın belli bir süre yüksek sıcaklıkta beklemesi sırasında bitümde hızlıca meydana gelen oksidasyon reaksiyonudur. Bitümün taşınma ve uygulanma aşamasındaki yaşlanma ise bu süre içinde maruz kaldığı sıcaklığa bağlı olarak meydana gelmektedir. Bu iki durum kısa dönem yaşlanma olarak adlandırılmaktadır. Ayrıca oksidasyon sertleşmesi, suyun ve havanın etkisi ile kaplamanın hizmet ömrü süresince devam eder ve uzun dönem yaşlanma olarak adlandırılır (Öztürk, 2004).



Şekil 3.30. Bitümün zaman içerisinde yaşlanması (Lav ve Lav, 2004)

Bitümün; oksidasyon, uçucu madde kaybı, tiksotropi, polimerleşme, parçalanma ve sineris olmak üzere altı farklı yaşlanma nedeni vardır (Tunç, 2004a).

Oksidasyon: Bitümün hidrokarbon yapısında bulunan karbon elementlerinin zamanla oksijen ile birleşip oksitlenmesi sonucu bitümün moleküler ağırlığının artması, dolayısıyla bitümün viskozluk ve katılık özelliklerinin artmasıdır.

Uçucu madde kaybı: Bitüm yapısında çok az bulunan uçucu maddelerin zaman içerisinde ya da ısı etkisi ile ayrılması sonucu bitümün sertleşmesidir.

Tiksotropi: Bitümün mekanik etkiler ile rijitliğini kaybedip akışkan hale gelmesi daha sonra fiziki şartların sabit kalması şartıyla belli bir durgunluk süresi sonunda rijitliğini tekrar kazanmasıdır.

Polimerleşme: Bitümün, hidrokarbon yapısının zamanla aşama aşama başkalaşıma uğrayarak sertleşmesidir.

Parçalanma: Bitüm içerisinde bulunan yağlı ve mumlu bölümlerin yumuşama periyotları sırasında agrega aracılığıyla absorbe edilmesi sonucunda oluşan sertleşmedir.

Sineris: Bitümün, yağlı kısımlarının ısının ve zamanın etkisiyle asfalttan ayrılıp sertleşmesidir.

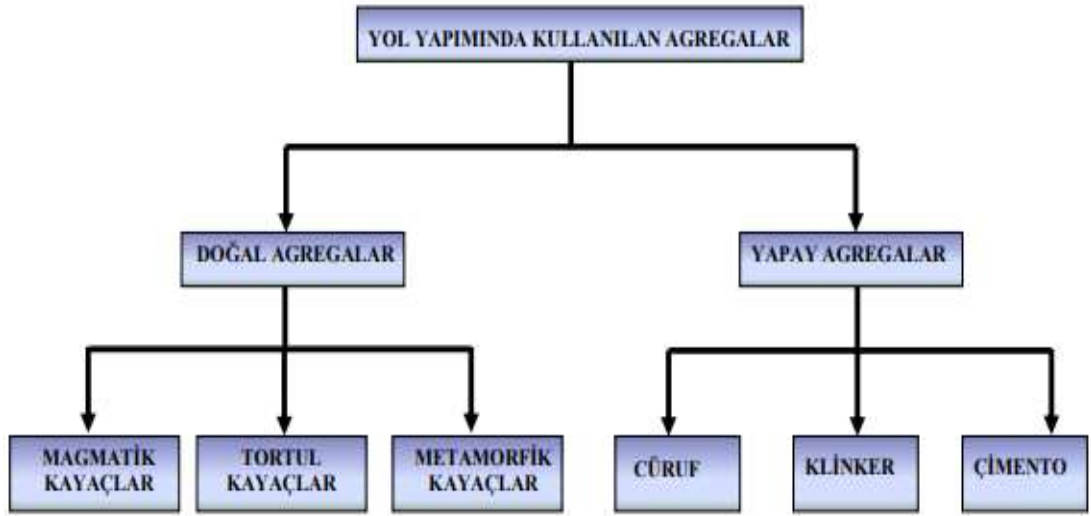
3.7. Bitümlü Sıcak Karışım Yapımında Kullanılan Malzemeler

Bitümlü sıcak karışımlar yapımında kullanılan malzemeler agregat ve bitümdür. Ayrıca karışımın performansını artırmak için gerektiğinde farklı katkı maddeleri de ilave edilir.

3.7.1. Agregat ve filler

BSK'yı; ağırlıkça %90-95 oranlarında, hacimsel olarak ise %80-85 oranlarında agregat ve filler oluşturmaktadır (Tunç, 2004b).

Agregat; farklı boyutlarda parçalanmış veya bütün taneler halinde doğal ya da yapay olarak bulunan, esnek üstyapıda yük taşıma performansını etkileyen en önemli malzemedir. Doğal agregatlar doğadan işlem gerektirmeden temin edilirken yapay agregatlar endüstriyel işlem ile kum, çakıl, kırmataş, cüruf ve diğer mineral bileşiklerden meydana gelen malzemelerdir (Tunç, 2004b; Çetin, 2007).



Şekil 3.31. Yol yapımında kullanılan agregatlar (Çetin, 2007)

Filler; mermer tozu, taş tozu, yanmış fırın atıkları, doğal kum, sönmüş kireç vb. maddelerden oluşan, bitümlü sıcak karışımındaki boşlukların doldurulması, aderans ve bağlayıcılık özelliklerinin artması için agregat karışımının genellikle %3-%9 oranlarında kullanılan malzemedir. Filler malzemesi, çok ince boyutlu un kıvamında olmalı, kil veya topraksı yapıya sahip olmamalı, organik ve zararlı madde bulundurmamalıdır (KGM, 2013).

3.7.1.1. Agregaların fiziksel özellikleri

Bitümlü sıcak karışım yapımında kullanılan agrega ve fillerin seçilmesinde temin edilen taş ocağı, maliyeti, karışıma uygunluğu önemli parametrelerdir. Karışımda kullanılacak agrega ve fillerin uygunluk durumu deneylerle fiziksel özellikleri belirlenerek karar verilir. Agregaların fiziksel özellikleri aşağıda anlatılmıştır (Tunç, 2007; Orhan, 2012):

Agregaların boyut sınıflandırılması: Agregalar dane çapı büyüklüklerine göre kaba agrega, ince agrega ve filler olarak sınıflandırılmaktadır.

a) Kaba agregalar: 4 numaralı yani 4,76 mm'lik elek üzerinde kalan agregalardır.

b) İnce agrega: 4 numaralı elekten geçen ve 200 numaralı üzerinde kalan yani 4,75 mm ile 0,075 mm elek arasında kalan agregalardır.

c) Filler: 200 numaralı yani 0,075mm elekten geçen agregalardır.

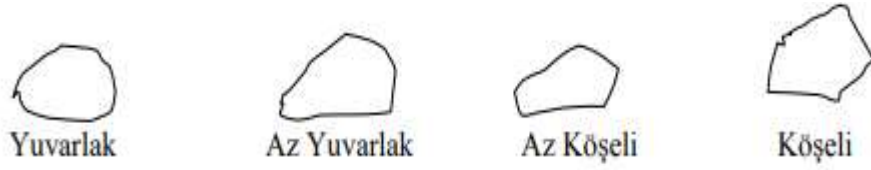
Agregaların maksimum dane boyutu ve gradasyonu: Agregaların maksimum dane boyutu ve gradasyonu kullanılacak tabaka çeşidine göre seçilmelidir.

Agregaların temiz olup olmaması: Agregalarda bitki atıkları, yumuşak malzemeler, kil topraklar, organik madde ve zararlı madde bulunmamalıdır.

Agregaların mineralojik sınıflandırılması: Agregaların mineralojik sınıflandırılması açısından dere malzemesi, kırma taş ve yapay taşlar olacak şekilde elde edilirler. Dere malzemesi yol yapımında konkasörlerde kırılıp kırma taş çakıl ve kum olarak kullanılır. Yapay taşlar, yüksek fırın cürufundan elde edilip poroz ve gevrek yapıya sahiptir. Tercih edilen agrega türü kayaların kırılması ile elde edilen mineral agregalardır.

Agregaların elde edilmelerine göre sınıflandırılması: Doğal agregalar (magmatik, tortul, metamorfik) ve yapay agregalar (cüruf, klinker, çimento) olacak şekilde elde edilirler.

Agregaların biçim sınıflandırılması (dane şekli): Agreganın dane şekli; işlenebilirlik, sıkıştırılma ve stabilite üzerinde etkilidir. İşlenebilirlik yuvarlak biçimindeki agregalarda daha yüksek olduğu için deformasyon direnci köşeli agregalara göre azdır. Bu yüzden köşeli ve kırılmış daneli agregalar tercih edilir.



Şekil 3.32. Agregaların biçim sınıflandırılması

Üç boyutlu biçim sınıflandırması ise, agregalar; küresel, kübik, yassı ve ince-uzun olarak sınıflandırılırlar. Yassı ve ince-uzun agregalar işlenebilirliği ve stabiliteyi özelliğini azalttığı için beton ve yol yapımında kullanılmaz, küresel ve kübik agregalar tercih edilir.



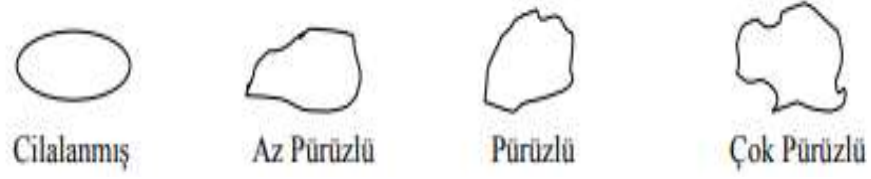
Şekil 3.33. Agregaların üç boyutlu dane biçimi sınıflandırılması

Agregaların gözeneklilik sınıflandırılması: Absorpsiyon ve bitüm yüzdesi üzerinde etkilidir. Agrega ve bitüm arasında adezyon sağlanabilmesi için az gözenekli agrega tercih edilir.



Şekil 3.34. Agregaların gözeneklilik sınıflandırılması

Agregaların yüzey yapısı (pürüzlülük) sınıflandırılması: Agregaların yüzey yapısı karışımın yük taşıma kapasitesini etkiler. Cilalanmış agregalar işlenebilirliği artırdığı için bitümlü karışımlarda tercih edilmez, beton yollarda kullanılır. Çok pürüzlü yüzeye sahip agregalar; içsel sürtünme açısını, stabiliteyi ve adezyonu artırdığı; işlenebilirliği azalttığı ayrıca kayma gerilmelerine karşı daha dirençli olduğu için tercih edilirler. Fakat agregaların boşluk hacmi sıkışmaya karşı direnç, lastik aşınması artışı ve degradasyon gibi olumsuz özelliklere sebep olur.



Şekil 3.35. Agregaların yüzey yapısı sınıflandırılması

Agregaların porozite sınıflandırması: Porozite; agregaların toplam boşluk hacminin, agreganın hacmine oranıdır ve absorpsiyon oranını etkilemektedir. Agregaların su emmeye sahip boşlukların miktarı BSK’da %0,5-1,5 aralığında olması istenir ve tabakalarda dona karşı duyarlı olması için porozitenin yüksek olması tercih edilir. Agreganın yeterince poroz olması bitüm emilimi sağlamasından agreganın bitüm arasında adezyonu ve su etkisi ile oluşacak soyulma direncini artırmaktadır. Agreganın çok poroz olması özgül ağırlığı azalttığı ve boşluk oranını artırdığı için kullanılan bitüm oranını artırmaktadır. Dolayısıyla sıcak havada terleme ve kismaya sebep olmaktadır. Agreganın çok az poroz olması da çok az poroz olmamalıdır.



Şekil 3.36. Agregaların porozite sınıflandırılması

Agregaların sağlamlık (durabilite) özelliği: BSK’da kullanılacak agregalar; kırılma, degradasyon (ince malzeme haline gelme), su ve don etkisi ile ayrılmaya karşı dirençli olmalıdır.

Agregaların bitümle kaplanabilme (soyulmaya karşı dayanım) özelliği: Agregalar bitümle kaplandıkları zaman, su etkisiyle soyulmamalıdır (asfaltın agreganın yüzeyinden ayrılması). Soyulma direnci düşük olan agregalarda bitüme özel katkı maddesi eklenerek soyulma önlenir.

Agregaların dona dayanıklılık özelliği: Doğal yollarla oluşmuş kum ve çakıl veya bunların kırılması ile elde edilen agregalar, doğada uğradıkları ayıklanma durumu nedeniyle genellikle çok az miktarda dona duyarlı daneler içerirler. Devamlı donma ve çözünme görülmeyen yörelerde bu özellik olmaz.

3.7.1.2. Agregalara uygulanan deneyler

Agregalar, üstyapının yük taşıma kapasitesini sağladığı için yolun performansını doğrudan etkiler dolayısıyla karayolunun belirlediği teknik şartnameye uygun seçilmelidirler. Agregada, kullanılacak tabaka türüne göre dane boyutuna ve gradasyonuna; işlenebilirlik, sıkıştırılabilirlik ve stabilitesi için dane şekline; pürüzlülük ile kayma gerilme direnci arasında doğru orantı olduğundan taşıyabildiği yük kapasitesi için yüzey yapısına; agregada ile bitümün yapışması için gözenekliliğe; don ve su etkisi ile ufalanmaya, ayrışma ve kırılma direnci için sağlamlık özelliğine ayrıca su etkisi ile soyulma olmaması için bitümle kaplanabilme özelliğine dikkat edilip özenle seçilmesi gerekir.

Kullanılan agregada ve fillerin özelliklerini belirlemek ve kullanıma uygunluğunu belirlemek için gerek duyulduğunda uygulanacak deneyler uyulması gereken şartnameleri ile birlikte aşağıda verilmiştir (Orhan, 2012; KGM, 2013):

- Elek Analizi Deneyi (ASTM C136, ASTM C117)
- Los Angeles (Aşınma) Deneyi (ASTM C131, AASHTO T96, TS EN 1097-2T)
- Yassılık İndeksi Değeri (BS 812)
- Hava Tesirlerine Karşı Dayanım (Donma) Deneyi (ASTM-C88, TS EN 1367-1)
- Cilalanma Deneyi (TS EN 1097-8)
- Vialit Yöntemi ile Yapışma Deneyi (KTŞ Kısım 403 Ek-B)
- Su Tesirine Dayanıklılık (Soyulma Mukavemet) Deneyi (ASTM D 1664)
- Özgül Ağırlık ve Absorbsiyon Deneyi (ASTM C127, TS EN 1097-6)

Özgöl ağırlık deneyleri

- Kaba Agrega Özgöl Ağırlık Deneyi (ASTM C127, AASHTO T 85-14 ve TS EN 1097-6)
- İnce Agrega Özgöl Ağırlık Deneyi (ASTM C128, AASHTO T 84-13)
- Filler Özgöl Ağırlık Deneyi (ASTM C854 ve TS EN 1097-7)

3.7.2. Bitüm

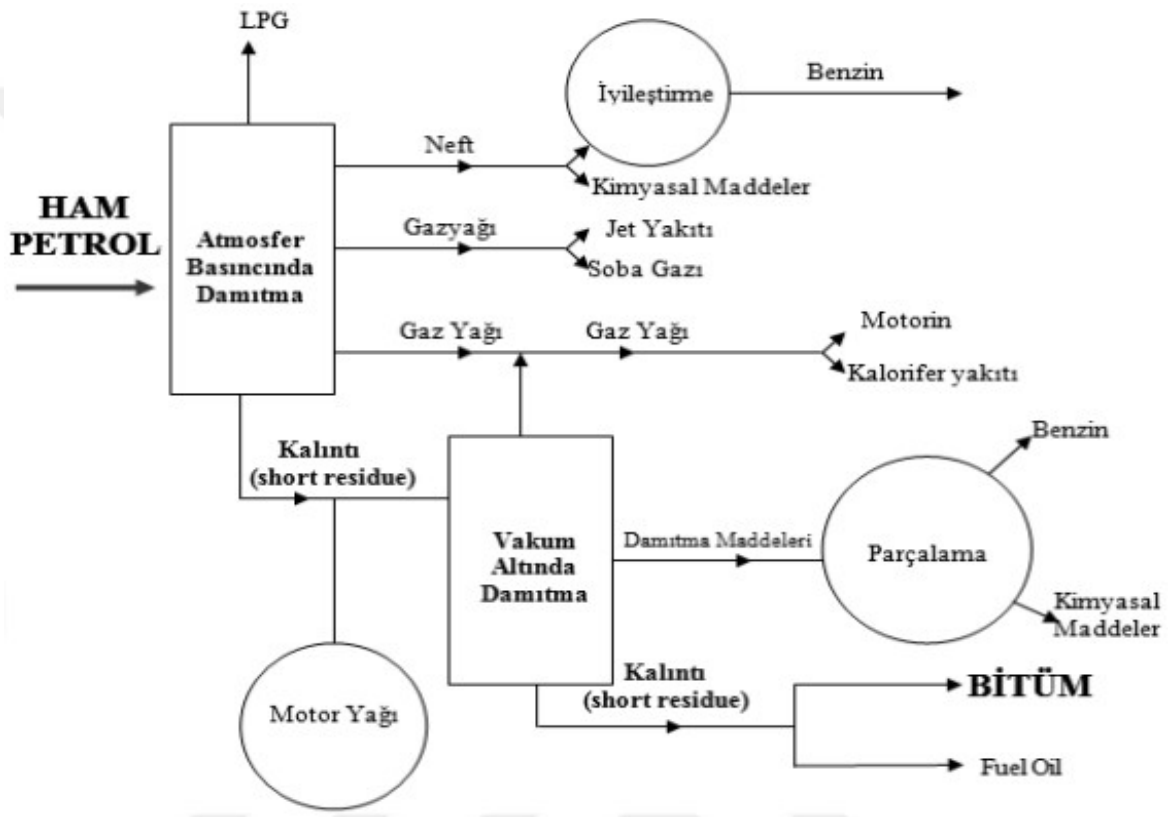
Bitüm, yolların yüksek performans göstermelerini sağlayan, kaplamanın hizmet ömrünü uzatan, yolların güvenli, konforlu ve çevre dostu olmasını sağlayan, dünya genelinde sürdürülebilir yollar tasarlamak için karayolu üstyapı kaplamalarında kullanılan malzemedir. Mühendislik alanında ve malzeme biliminde bitüm yerine asfalt, asfalt çimentosu, asfalt bağlayıcı kavramları da kullanılır (Yüknü vd., 2021). Bitüm; dayanıklı, iyi bağlayıcı olması, termoplastik olması (ısıtılınca kıvamının değişmesi), geçirimsiz olması, modifiye edilebilir olması, geri dönüştürülebilir olması, adezyon ve kohezyon özelliklerinden dolayı karayolu üstyapı kaplamalarında BSK tabakalarında bağlayıcı malzeme olarak kullanılır.

3.7.2.1. Bitümün elde edilmesi ve özellikleri

Bitüm, doğada hazır bir şekilde bulunan ve petrolün rafinerilerde damıtılması ile elde edilmek üzere iki farklı şekilde üretilir. Ham petrolün rafinerilerde damıtılma işlemi ile elde edilen bitüm, koyu kahverengi-siyah renklere olan sıvı veya yarı katı- sıvı kıvamında olan, bağlayıcılık özelliği fazla olan, doğal ya da pirojenik kökenli hidrokarbonlardan ve türevlerinden oluşan, toluende çözünen, ısı uygulandığında yumuşayan, uçucu olmayan, yapışkan ve su geçirmeyen, asit ve tuzlara karşı dayanıklı olan bir yapı malzemesidir. Ayrıca bitüme ısı uygulandığında yumuşayan bir malzemedir (Kuloğlu vd., 2008).

Ham petrolün içinde bulunan bitüm; bölgeye göre, arazinin cinsine göre ve bulundukları yatakların sınıfına göre farklı şekillerde ortaya çıkmaktadır. Karayolu uygulamalarında genellikle rafineri edilmiş bitümlü bağlayıcılar kullanılır.

Petrol kuyularından alınan ham petrol rafineriye getirilerek, pompaların yardımı ile tanklara aktarılır ve ısıtma bölgesine yönlendirilip sıcaklığı artırılmış petrol damıtma kolonlarına ulaşır. Uçucu özelliğe sahip bileşenler bu bölümün üst tarafından çıkarak soğutucular ile yoğunlaştırılarak ayrılır. Damıtma işlemi sırasında herhangi bir kimyasal değişim olmaz ama değişik sıcaklıklardaki bileşenler buharlaşıp petrolden ayrılırlar. Şekil 3.37’de görüldüğü gibi damıtma işlemi ile bitüm elde edilirken sıcaklık, basınç ve su buharı miktarı parametrelerin değişiklik göstermesi ile bitüm özellikleri de farklılık göstermektedir (Lav ve Lav, 2004).



Şekil 3.37. Petrolün damıtılması ve bitümün elde edilmesi (Lav ve Lav, 2004)

3.7.2.2. Bitümün kimyasal yapısı

Bitümün kimyasal yapısı, polaritesi ve moleküler ağırlıkları farklı olan birçok moleküler türün bileşiminden oluşmaktadır. Bitüm kompleks bir kimyasal yapıda olduğu için kimyasal analizi çok zordur. Bu yüzden genellikle fiziksel özellikleri analiz edilmektedir. Bitümlerin kimyasal bileşimi asfaltenler ve maltenler olacak şekilde iki kimyasal gruba ayrılmaktadır.

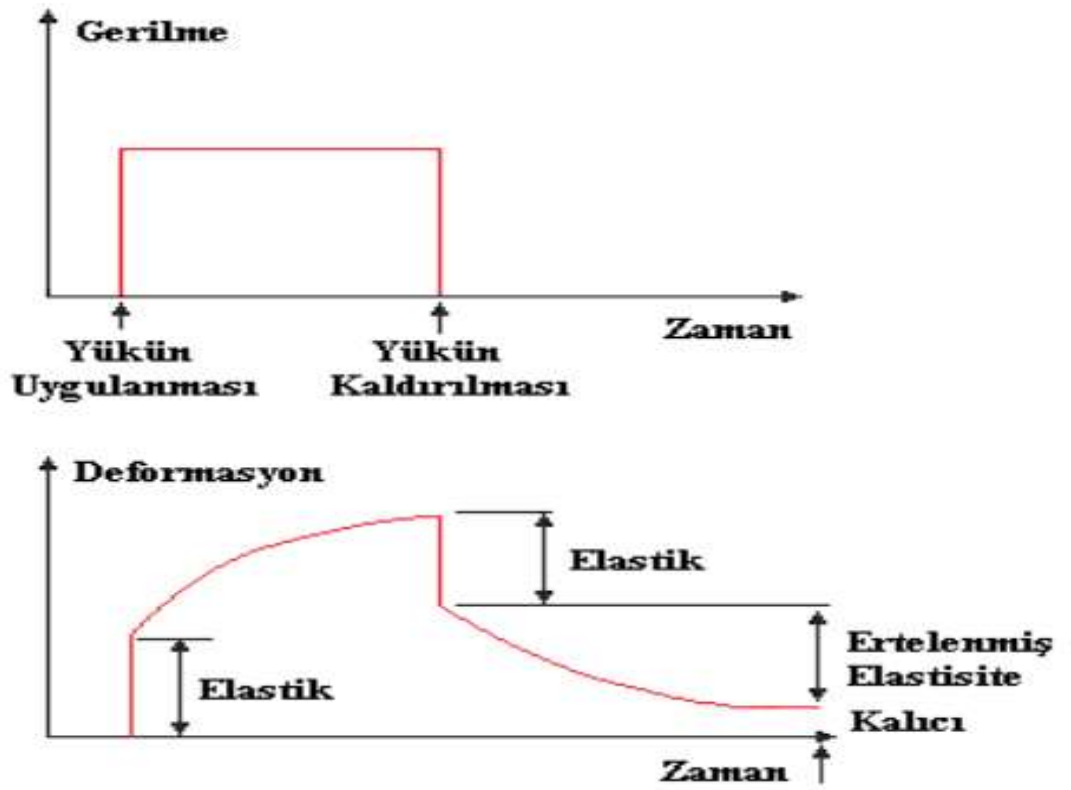
Maltenler kendi aralarında reçineler, aromatikler ve doymunlar olacak şekilde üç alt sınıftan oluşmaktadır. Asfaltlenler ise petrol kaynağının çeşidine göre elde edilmektedir. Bitümlerin kimyasal yapısı genellikle karbon, hidrojen, sülfür, oksijen, nitrojen elementlerinden oluşur fakat mutlak kimyasal bileşimi bitümün elde edileceği ham petrol kaynağına, üretim aşamasına, işlemler sırasındaki yaşlanmasına göre değişmektedir. Bitüm içerisindeki asfelten içeriğinin artmasıyla bitüm daha viskoz ve daha sert olmaktadır (Read ve Whiteoak, 2003). Bitümlerin kimyasal içeriği genellikle %82 - %88 oranlarında karbon, %8 - %11 oranlarında hidrojen, %1 - %6 oranlarında sülfür, %0 - %1,5 oranlarında oksijen, %0 - %1 oranlarında nitrojen ve yüksek oranlarda metal bileşenlerden oluşmaktadır (Tunç, 2007).

3.7.2.3. Bitümün davranışı

Bitüm, ısıtılarak yumuşayıp sıvılaştırılabilen böylece kullanılacak yerlerde kolay bir şekilde yayılıp yüzeyleri kaplayabilen ayrıca dayanıklılık özelliği sayesinde mühendislik alanında birçok yapı projesinde kullanılan bir malzemedir. Gün geçtikçe artan ulaşım ihtiyacı ile beraber artan trafik yükleri nedeniyle üstyapıların yüksek performans, uzun ömürlü sürdürülebilir yollar talebi için kullanılan bitüm, karışım içindeki küçük hacmine rağmen dayanıklı ve viskoelastik özelliği sayesinde çok önemlidir. Bitüm kalitesindeki en önemli parametreler penetrasyon, yumuşama noktası ve viskozitedir. Dolayısıyla en kaliteli ve bağlayıcılığı en iyi olan bitümler düşük penetrasyonlu, yüksek yumuşama noktası ve maksimum viskoziteye sahip bitümlerdir. Bu parametreler haricinde parlama noktası, yoğunluğu, kohezyonu (bağlayıcılık) ve adezyonu (yapışma) da kalite belirlemede önemli özelliklerdir (Yükü vd., 2021).

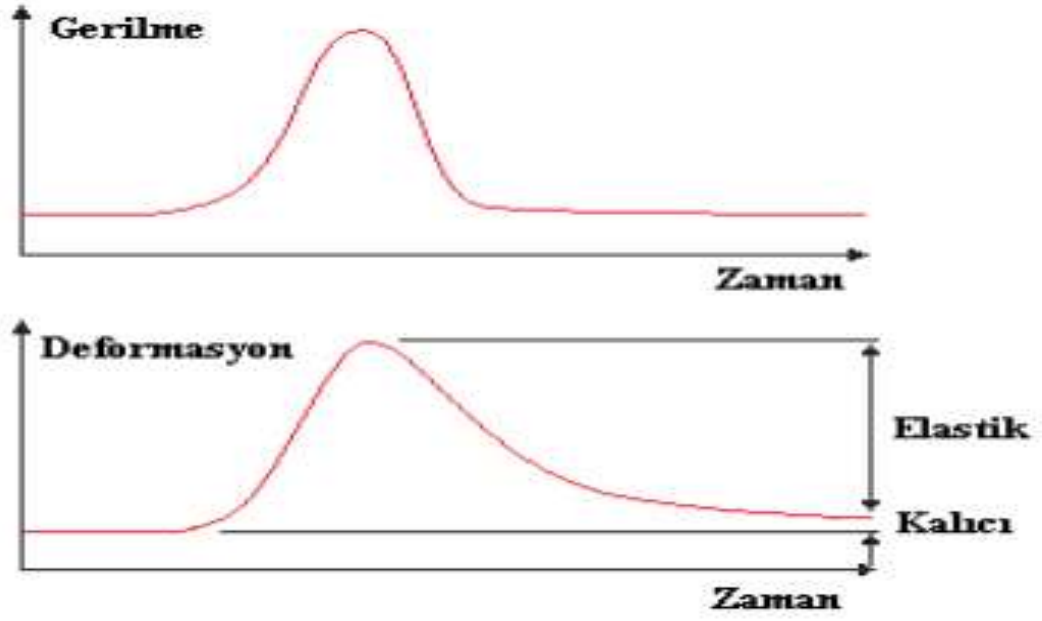
Bitüm, yükleme ve sıcaklık koşullarına bağlı olarak viskoelastik bir davranış göstermektedir. Karayolu üstyapı kaplama yapımında iklim ve trafik koşullarına uygun olarak kullanılacak bitüm sınıfı seçimi önemlidir. Sıcak iklimlerde ve devamlı yükleme olduğunda viskoz bir sıvı gibi davranış gösterirken soğuk iklimlerde ve hızlı yükleme olduğunda elastik bir katı gibi davranış gösterir. Bu yüzden bitüm viskoelastik bir malzemedir (Tunç, 2004b).

Aşağıdaki Şekil 3.38’de bitümün statik yükler karşısındaki davranışı gösterilmektedir. Yükün uygulanması ile aniden meydana gelen deformasyonu, yükün kaldırıldığı zamana kadar aşamalı olarak artan deformasyon takip etmektedir. Zaman ile ilişkili olacak şekilde, oluşan deformasyon değişimleri bitümün viskoelastikliğinden kaynaklanmaktadır. Yükün kaldırılması ile elastik deformasyon aniden geri dönmekte ve zaman içerisinde “ertelenmiş elastisite” olarak tanımlanan bir kısım geri dönüşüm daha oluşmaktadır. Sonuç olarak geri kazanılamayan viskoz davranışın neden olduğu bir miktar kalıcı deformasyon oluşmaktadır (Read ve Whiteoak, 2003).



Şekil 3.38. Bitümün statik yükler karşısındaki davranışı (Read ve Whiteoak, 2003)

Aşağıdaki Şekil 3.39’da bitümün dinamik yükler yani hareketli trafik yükler karşısındaki davranışı gösterilmektedir. Deformasyon-zaman grafiğinde görüldüğü gibi deformasyon değerleri yük etkisinden önce ve sonra aynı gözükse de aslında küçük miktarda kalıcı deformasyon meydana gelmektedir. Bu küçük miktardaki kalıcı deformasyon sadece bir tekerlek yükünü tanımlasda milyonlarca tekerlek yükünün tekerrürü sonucunda kaplamanın yapısında büyük bozulmalara sebep olmaktadır.



Şekil 3.39. Bitümün dinamik yükler karşısındaki davranışı

3.7.2.4. Bitümün fiziksel özelliklerinin belirlenmesi için uygulanan deneyler

Yol yapımında kullanılacak bağlayıcı, karayolunun belirlediği teknik şartname çerçevesinde iklim koşulları, trafik yoğunluğu, yolun yapılacağı zemin özellikleri gibi faktörler değerlendirilerek seçilmektedir. Bitümün istenilen şartlara uygunluğu kontrol edilmesi amacıyla saf bitüme deneyler yapılmaktadır. Kullanılan bağlayıcı türüne göre gerek duyulduğunda genellikle uygulanan deneyleri aşağıdaki gibi sıralamak mümkündür (KGM, 2013):

- Özgül Ağırlık Deneyi
- Penetrasyon Deneyi
- Yumuşama Noktası Deneyi
- Parlama Noktası Deneyi
- Viskozite Deneyi
- Düktilite Deneyi
- Elastik Geri Dönme Deneyi
- RTFOT Deneyi

3.7.3. Katkı maddeleri

BSK'nın yüksek performansı için farklı katkı maddeleri saf bitüme veya doğrudan karışıma eklenerek kullanılmaktadır. Kullanılan katkı maddesi ile özellikleri değişen bitümlere modifiye bitümler, karışımlara ise modifiye karışımlar denilmektedir. Modifiye bitümlü karışımların katkı kullanımı ile değişen özellikleri çeşitli deneylerle belirlenmektedir (Ilıcalı vd., 2001).

3.7.3.1. Katkı maddelerinin sahip olmaları gereken özellikler

Kullanılacak katkı maddesinin karışımda etkili olabilmesi ve bitümün özelliklerini iyileştirebilmesi için sahip olması gereken özellikler aşağıda sıralanmıştır (Ilıcalı vd., 2001; Hunter vd., 2015):

- Kullanımı pratik ve geleneksel ekipmanlarla kullanılabilir olmalıdır.
- Ekonomik olmalıdır.
- Kolay temin edilebilir olmalıdır.
- Bitüm ile uyum sağlayabilmelidir.
- Bitüm içerisinde homojen dağılabilmelidir.
- Bitümlü karışımın hazırlanma sürecindeki sıcaklıklarda bozulmamalıdır.
- İşlenebilirlik bakımından uygulamada zorluk oluşturmamalıdır.
- Bitümün karıştırma ve serme sıcaklıklarında özellikle yüksek sıcaklıklarda viskozitesini artırmadan akma direncini güçlendirmelidir.
- BSK üretiminde yüksek uygulama sıcaklığı gerektirmemelidir.
- Bitümün düşük sıcaklıklarda aşırı sert ve kırılgan durumdan koruyarak esnek olmasını sağlamalıdır.
- Bitümün adezyon ve kohezyon özelliğini iyileştirmelidir.
- Bitüm ile agrega arasındaki bağı zayıflatmamalıdır.
- Depolama, taşıma, uygulama ve hizmet ömrü sırasında fiziksel ve kimyasal özelliklerini kaybetmemelidir.
- Karışımda kullanıldıktan sonra yeterince mukavemet ve rijitlik sağlamalıdır.

3.7.3.2. Katkı maddelerinin kullanılma sebepleri

Bitümlü sıcak karışımları modifiye etmek için kullanılan katkı maddelerinin amaçları aşağıda sıralanmıştır (Lu ve Isacson, 2000; Read ve Whiteoak, 2003; Yılmaz vd., 2013; Al Hawesah vd., 2021; Li, Hao, vd., 2021; Xu vd., 2021):

- Bakım-onarımı azaltarak daha ekonomik olmasını sağlamak.
- Bitümün geleneksel özelliklerini (penetrasyon, yumuşama noktası, yoğunluk, viskozite vb.) iyileştirmek.
- Yüksek sıcaklıklarda rijit davranış, düşük sıcaklıklarda ise esnek davranış göstermek.
- Kalıcı deformasyonları ve tekerlek izi oluşumunu azaltmak.
- Yorulma ve kayma direncini yükseltmek.
- Yaşlanma ve oksidasyon direncini artırmak.
- Nem stabilitesini iyileştirmek.
- Bitümlü sıcak karışımın, visko-elastik deformasyonunu azaltmak için bitümü sertleştirmesi veya bitüm içindeki toplam viskoz eleman oranını azaltmak için elastik elemanların oranını artırarak yüksek sıcaklıklarda kalıcı deformasyon direncini artırmak.
- Bitümün sertliğini artırarak kaplamanın dayanımını ve hizmet ömrünü artırmak ayrıca malzemenin yük dağıtma yeteneğini artırmak.

3.7.3.3. Çalışmada kullanılan katkı maddesi (grafen ve türevleri)

Bitümlü bağlayıcılara katkı maddesi olarak çeşitli nanomalzemelerin (nano kil, nano ölçekli CaCO_3 , nano ölçekli SiO_2 , grafen, grafen oksit, grafen nanoplatelet vb.) eklenmesi ile mekanik ve fiziksel özelliklerinde iyileşme ile beraber dayanıklılık performanslarında, yaşlanma ve yorulma dirençlerinde artma olduğu incelenen çalışmalar ile gösterilmiştir (Papadimitropoulos vd., 2018). Nanomalzemelerin yüzey alanı geniş ve boyutları (1-100 nm) küçük olduğundan dolayı asfalt içerisinde iyi dağılılarak asfaltın bağlayıcılığını artırarak mikro çatlakların oluşmasını ve gelişmesini önleyerek yolun servis ömrünün uzamasına ve kalıcı deformasyonların azalmasına yardımcı olmaktadır (Li vd., 2017; Cheng vd., 2020).

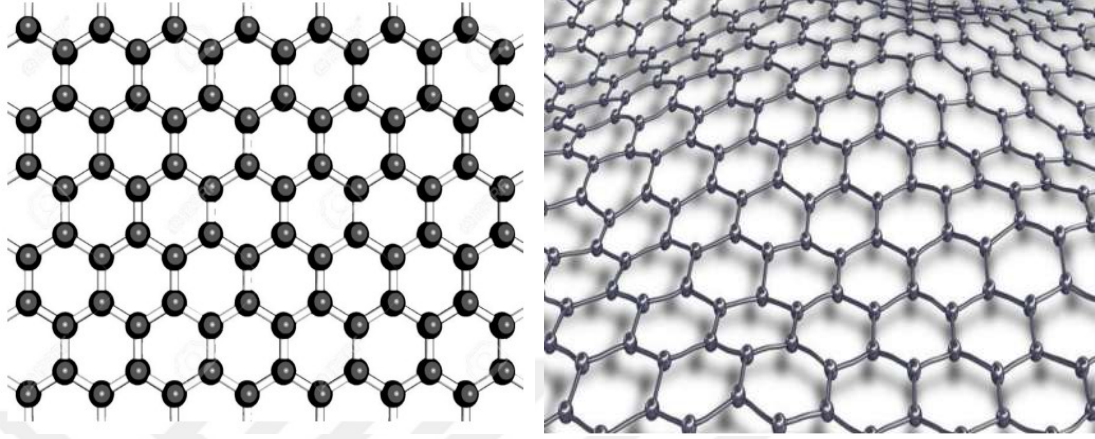
Son zamanlarda, ulaşım mühendisliğinde asfalt katkı maddesi olarak, sağlık alanında bulaşıcı hastalıklarla mücadelede, çevre bilimi alanında su arıtımında, gıda ve tarım sektöründe zararlı böceklerden uzaklaştırma ve daha birçok alanda sıklıkla kullanılan bir diğer katkı ise grafen ve türevleridir (Han vd., 2021; Dey vd., 2022; Wang vd., 2022; Kumari ve Samadder, 2022; Loudiki vd., 2022). Grafenin birçok endüstride kullanılmasının amacı; ısıyı çok iyi iletmesi, ışık geçirgenliği, en ince malzeme olduğu halde kuvvetli karbon bağları sayesinde bilinen en dayanıklı malzeme olması, (çelikten 100-200 kat daha sağlam), saydam, sert ve esneme özelliği sayesinde farklı biçimlerdeki malzemeleri kaplayabilmesidir (Novoselov vd., 2004; Nair vd., 2008; Stoller vd., 2008; Çiftçi vd., 2016; Qiao vd., 2018). Grafenin; grafen oksit (GO), grafen nanoplatelet (GNP), pul grafit ve genişletilmiş grafit gibi birçok türevi vardır ama ulaşım mühendisliğinde yaygın olarak kullanılan GO ve GNP' dir (Li, Ren, vd., 2021; An vd., 2023).

Grafen modifiyeli asfalt bağlayıcıların (GMAB) bağlayıcılık özelliğinin çok iyi olması, yorulma ve tekerlek izi direncini iyileştirmesi ile yolu daha stabil yaptığı için yolun hizmet ömrünü artırdığı görülmüştür (Han vd., 2021; He vd., 2022; Li vd., 2022). Termal özellikler bakımından, GMAB'lerin saf bağlayıcılara göre daha yüksek hızlarda ısıtılabilirlikleri, daha yüksek sıcaklığa ulaşabildikleri ve malzeme boyunca ısının daha hızlı yayıldığı görülmüştür. Ayrıca bu durumun stabiliteyi olumsuz bir şekilde etkilemediği, bu nedenle grafen oranı arttıkça malzemenin daha büyük bir ısıtma kapasitesine sahip olduğu ve bitümün ısıtılma ve ısı transferi kapasitelerini artırarak iyileştirdiği tespit edilmiştir (Moreno-Navarro vd., 2018).

3.7.3.4. Grafen

Grafen, altı tane karbon atomunun bal peteği düzeninde birbirlerine bağlanması ile oluşan iki boyutlu polimerik bir yapıdır. Siyah renkli, kokusuz ve toz halinde bulunan bir nanomalzemedir. Grafen yapısında bulunan karbon atomlarını birbirine bağlayan çift bağların kolay bir şekilde yer değiştirebilmesi, grafene iyi derecede iletim kapasitesi sağlar. Ayrıca bu güçlü karbon bağları sayesinde bilinen en ince malzeme olduğu halde test edilen en sağlam malzemedir.

Bilim dünyasında çok popüler olan grafen aslında yabancı olduğumuz bir madde değildir. Grafen tabakalarının üst üste dizilerek oluşturduğu grafit malzemesi günlük hayatta kullandığımız kurşun kalemelerin içerisindeki malzemedir (Adlı, 2019).



Şekil 3.40. Grafen'in yapısı (Adlı, 2019)

Grafen, fiziksel ve kimyasal yöntemlerle farklı şekillerde sentezlenmektedir. Kostya S. Novoselov ve Andre Geim bilim adamları 2004 yılında grafeni tek tabaka halinde sentezlemiş ve çok farklı özelliklerini kanıtlayarak 2010 Nobel Fizik Ödülü almışlardır. Grafen üretiminde kullanılan birkaç yöntem şöyledir: Grafit yüzeyine yapıştırılan selobantın çekilmesi ile selobant üzerine yapışan grafen tabakaları yöntemi ile elde edilebilir fakat elde edilen grafenin kalın olması ve yüzey alanının düşük olmasından dolayı tercih edilmez. Grafit tabakasının bir yüzey üzerinde kaydırılarak grafen tabakalarının ayrıştırılması yöntemi ile 100 mikrometre uzunlukta grafen parçacıkları sentezlenebilir. Ayrıca grafenin ilk defa sentezlenmesinde Manchester grubu tarafından bu yöntem kullanılmıştır. Kaliteli bir şekilde grafen üretimi kimyasal buhar biriktirme metodu (CVD) ile üretmektir. Metalin üstüne buhar halindeki karbon atomlarının biriktirilmesi ve yüzeyden alınması şeklinde yapılır. Grafitten üretilen grafen, çeşitlilik olması, daha ucuz ve daha fazla üretim için çok fazla karbon atomu içeren farklı maddeler kullanılarak da elde edilmeye çalışılmaktadır (Çiftçi vd., 2016; Adlı, 2019).

2022 yılında Ankara'da açılan Nanografi Nano Teknoloji firması, grafeni ilk seri üretebilen firma olmuştur. Türkiye grafen seri üretimi yapabilen 10 ülkeden biridir.

Grafen ve türevlerinin farklı kompozitlerle kullanılması fiziksel özelliklerinde; elektriksel iletkenlik, termal iletkenlik, sertlik, mukavemet, viskozite vb. iyileştirmeler görülmektedir. Ayrıca grafen günümüzdeki uygulamalarda kullanılan birçok malzemelerin yerine kullanılabilecek, dolayısıyla uygulamaların geliştirilmesini sağlayabilecektir. Örneğin; grafen ve türevleri, uçak yapısında çeliğin yerine geçerek, yakıt verimliliğini ve menzili artırarak ayrıca ağırlığı azaltarak performanslarını artırabilecek. Yüksek iletkenlik özelliği nedeniyle yıldırım çarpması sonucu oluşan elektrik arızasını gidermek için uçağın yüzey malzemesini sarmak için bile kullanılabileceklerdir (Nanografi, 2024).

Grafenin birçok endüstride kullanılmasının ve geleceğin nanomalzemesi olmasını sağlayan en bilindik özelliklerini aşağıdaki gibi sıralamak mümkündür (Çiftçi vd., 2016; Adlı, 2019):

- -75°C ile 200°C yüksek sıcaklıklara karşı dirençlidir.
- Yaklaşık 347°C sıcaklıkta yanar.
- 5000 W/mK yüksek termal iletkenliğe sahiptir.
- $15000\text{ cm}^2/\text{Vs}$ yüksek taşıyıcı mobilitesine sahiptir.
- $2630\text{ m}^2/\text{g}$ yüzey alanına sahiptir.
- %2,3'lük bir beyaz ışık emilim potansiyeli vardır.
- 800 km/s hıza sahiptir.
- Yüksek gerilme direncine sahiptir.
- Yüksek geçirgenliğe sahiptir.
- Oda sıcaklığında bilinen en iyi iletkendir.
- Çelikten yaklaşık 200 kat daha güçlüdür.
- Çok saydamdır.
- Elmaştan daha serttir.
- $0,34\text{ nm}$ tabaka kalınlığıyla bilinen en ince ve en hafif malzemedir.
- %20'lik esneme özelliği sayesinde malzemelerin yüzeylerini kolayca kaplayabilmektedir.

3.7.3.5. Grafen Oksit (GO)

Grafen oksit; grafen ile aynı özellikleri taşıyan, çoğunlukla sülfürik asit gibi kimyasallarla elde edilen, grafitin oksitlenmesiyle oluşturulan, oksijen fonksiyonel grupları ile güçlendirilmiş iki boyutlu bir malzemedir. 90 ml konsantre sülfürik asit ve 10 ml konsantre fosforik asit şişeye doldurularak karıştırılır ve 4 g doğal pul grafit ilave edilir. Sonra 9 g potasyum permanganat ilave edilir ve 50°C'lik bir su banyosunda 30 devir/dakika hızında 8 saat karıştırılır. Çözelti parlak sarı olana ve 3 saat boyunca tamamen reaksiyona girene kadar hidrojen peroksit ilave edilir ardından çözelti 50°C'de 60 dakika süreyle ultra sonikasyona tabi tutulur. Daha sonra çözelti 1000 ml saf su ile seyreltilir ve süzülür. Bu işlem iki kez tekrarlanır ardından ürün kurutulur böylece GO elde edilmiş olur (Song vd., 2014; Guerrero Contreras ve Caballero Briones, 2015; Zeng vd., 2017; Li vd., 2023).

GO; grafene göre üretim kolaylığı, düşük üretim maliyeti, büyük ölçekli üretim ve kolay işlenme avantajları vardır. Ayrıca grafene göre sulu çözeltilerde dağılımının çok daha iyi olmasından dolayı grafenden daha çok tercih edilmektedir (Adnan vd., 2021).

3.7.3.6. Grafen Nanoplatelet (GNP)

Grafen Nanoplateletler (GNP), bir araya toplanmış grafen tabakalarıdır. Tek bir grafen tabakası ise altıgen şeklinde düzenlenmiş karbon atomlarından oluşan tek bir tabakadır. GNP, kalınlığı 0,7-100 nm olan grafen ile aynı özellikleri taşıyan grafenin bir türevi olan nanomalzemedir. Grafen, pahalı bir malzeme olması, yaklaşık 10 yıl öncesine kadar sentezlenmesinin zor olması ve seri üretiminin olmamasından kaynaklı GNP düşük maliyeti ve kolay üretimi ile bir seçenek olmuştur. Ayrıca GNP'ler düşük üretim maliyeti nedeniyle (en azından büyük ölçekli imalat analizi açısından) saf grafen ve diğer türevlere göre daha çok öne çıkmaktadır (Hafeez vd., 2019; Jiménez-Suárez ve Prolongo, 2020; Leone vd., 2022; Jing vd., 2023).

Katkı olarak GNP seçilmesinin nedeni; ısı iletkenliğinin çok iyi olması, sert bir yapıda olması ile birlikte esnek bir malzeme olması, sıcaklık direncinin iyi olması, küçük boyutu ve yüksek yüzey alanı sayesinde bitümle güçlü bir bağ oluşturarak, penetrasyon değerinde azalmaya ve yumuşama noktasında bir artışa yol açarak performansını iyileştirmesidir

(Sarsam, 2013). Ayrıca, çok dayanıklı olması böylece stabilitesi yüksek yollar yapılarak kaplama ömrünü artırması, GNP modifiyeli bitümün başlangıç maliyetinin geleneksel bitümden biraz daha fazla olmasına rağmen kaplamaların bakım-onarım masraflarını en az seviyeye indirerek ekonomik ve sürdürülebilir yollar tasarlamak için en uygun nanomalzeme olduğu düşünülmektedir.



Şekil 3.41. Grafen nanoplatelet

Grafen ve GO yerine GNP kullanılma sebebi ise üretiminin kolay olması ve daha ekonomik olmasıdır. Maliyet açısından değerlendirilecek olursa; boyut, üretim şekilleri ve alınan miktara göre birim fiyat farklılık göstermektedir. Genel olarak kullanılan bazı çeşitleri ve nanografi firmasının belirlediği güncel fiyatları; holey süper grafen 1.380 gr/€, CVD grafenden; 2'' boyutlu 269 adet/€, 3'' boyutlu 324 adet/€, 4'' boyutlu 423 adet/€, bor katkılı grafen nanotoz 323 gr/€ iken grafen oksitte; tek katmanlı GO 181 gr/€, 2-5 katmanlı GO 90 gr/€, azaltılmış GO 64 gr/€ grafen nanoplateletler ise çap ve yüzey alanına göre farklılıklar gösterebilir hepsi 9-10-11-12 gr/€'dur (Nanografi, 2024). Görüldüğü gibi ekonomik açıdan grafen ve GO'nun her çeşidi maliyetli iken GNP en uygundur. Ayrıca daha önce anlatıldığı üzere üretim kolaylığı açısından da en uygunu GNP'dir. Bu yüzden bu çalışmada GNP kullanılmıştır.

3.7.3.7. Grafen ve türevlerinin bitüm üzerindeki etkileri

Grafen ve türevleri olan grafen oksit ve grafen nanoplatelet katkı maddelerinin bitüm üzerindeki olumlu ve olumsuz etkileri bu tez çalışması için birçok araştırmanın incelenmesi ile taranan literatürün sonucunda Tablo 3.1’de özetlenmiştir.

Tablo 3.1.Grafen ve türevlerinin bitüm üzerindeki etkileri

Özellikler	Etkisi	Kaynaklar
Penetrasyon	↓	(Zeng vd., 2020; Zhou vd., 2021)
Yumuşama Noktası	↑	(Zhu vd., 2020; Li, Wang, vd., 2021)
Viskozite	↑	(Nazki vd., 2020; Wang vd., 2022)
Süneklik	↓	(Aravind vd., 2018; Zhu vd., 2020)
Yaşlanma Direnci	↑	(Zeng vd., 2020)
Düktilite	↓	(Şimşek, 2021)
Nem Stabilitesi	↑	(Adnan vd., 2020)
Esneklik	↑	(Adnan vd., 2020; Zhou vd., 2021)
Sertlik Modülü	↑	(Ghalandari Shamami vd., 2023)
Depo Modülü	↑	(Han vd., 2018)
Marshall Stabilitesi	↑	(Aravind vd., 2018; Wang vd., 2022)
Akma	↑-↓	(Aravind vd., 2018; Adnan vd., 2020)
Rijitlik	↑	(Yang vd., 2019)
Termal Duyarlılık	↓	(Polo-Mendoza vd., 2023)
Termal İletkenlik	↑	(Jiménez-Suárez ve Prolongo, 2020)
Isı İletkenliği	↑	(Nazki vd., 2020)
Düşük Sıcaklık Performansı	↓	(Zeng vd., 2020; Li, Wang, vd., 2021)
Yüksek Sıcaklık Stabilitesi	↑	(Zeng vd., 2020)
Düşük Sıcaklıkta Çatlama Direnci	↑	(Han vd., 2018)
Donma-Çözülme Direnci	↑	(Jiménez-Suárez ve Prolongo, 2020)
Kayma Modülü	↑	(Moreno-Navarro vd., 2018)
Faz Açısı	↓	(Moreno-Navarro vd., 2018)
Kırılma Direnci	↑	(Adnan vd., 2020)
Yorulma Direnci	↑	(Habib vd., 2015; Zhou vd., 2021)
Tekerlek İzi Direnci	↑	(Wu vd., 2022)
Kalıcı Deformasyon Direnci	↑	(Ghalandari Shamami vd., 2023)

Açıklama: ↑ Artış, ↓ Azalma; Siyah Renk Olumlu Etki, Kırmızı Renk Olumsuz Etki

3.8. Bitümün Modifiye Edilmesi

Saf bitümün, mekanik ve fiziksel özelliklerinin gelişmesi ayrıca BSK uygulamalı kaplamanın performansının iyileşmesi için bitüm çeşitli katkılarla modifiye edilmektedir. Bitümlerin modifiye edilmesi ile modifiye bitümün; elastikiyet, kohezyon, adezyon, yaşlanma dayanıklılığı, ısı duyarlılığı, kimyasal uyumu ve stabilite özellikleri değiştirilebilmektedir. Böylece hızla artan trafik yoğunluğunu karşılayabilecek daha dayanıklı, ekonomik ve uzun ömürlü yollar tasarlanmaktadır. Bitüm modifikasyonu; katkı malzemesinin doğrudan bitüme eklenerek modifiye bitüm elde edilmesi ve katkının asfalt plentinde doğrudan karışıma eklenerek modifiye karışım elde edilmesi olmak üzere iki şekilde yapılır. Modifikasyon için çevre ve iklim şartları dikkate alınarak katkı malzemesi seçilir (Yüknü vd., 2021).

Bitümlerin uygun katkıları kullanılarak modifiye edilme sebepleri veya modifiye edilmesi ile elde edilen avantajlar aşağıda sıralanmıştır (Yüknü vd., 2021):

- Bitümün performansını artırmak.
- Sıcaklık değişimlerinde duyarlılığı azaltmak.
- Sıcaklık etkisi ile oluşan deformasyonları azaltmak.
- Yüksek hizmet sıcaklıklarında daha sert karışımlar üreterek tekerlek izi oluşumunu engellemek.
- Düşük hizmet sıcaklıklarında daha yumuşak karışımlar üreterek çatlakları azaltmak.
- Yaşlanma direncini artırmak.
- Rijitliği azaltmak.
- Karışımın trafik ve çevre etkilerine karşı stabilitesini ve durabilitesini artırmak.
- Kaplamanın aynı dayanıklılıkta olması şartı ile kaplama kalınlıklarını azaltmak.
- Yapım sıcaklıklarında viskoziteyi düşürerek işlenebilirliği artırmak.
- Kaplamanın ömrünü artırmak.
- Agregaların etrafında kalınlığı fazla bitüm tabakaları oluşturarak, bitüm ile agregaların birbirine yapışma özelliğini geliştirip soyulmayı engellemek.
- Sürüş güvenliğini olumsuz etkileyen bitümlü karışımdaki terlemeyi azaltmak.
- Kaplamanın bakım aralıklarını uzatarak bakım maliyetlerini azaltmak.

4. MATERYAL ve YÖNTEM

4.1. Materyal

Bağlayıcı olarak 70/100 penetrasyonlu bitüm kullanılmıştır. Kullanılan agrega, kalker esaslı kırmataş agregası olup Karayolları 16. Bölge Müdürlüğü 164. Şube Müdürlüğü'nden temin edilmiştir. Çalışmada kullanılan Grafen Nanoplatelet (GNP) katkı maddesi ise Nanografi Nano Teknoloji firmasından temin edilmiştir.

4.1.1. Bitüm

Bağlayıcı olarak 70/100 penetrasyonlu saf bitüm kullanılmıştır. Bitüm özgül ağırlık deneyi yapılarak kullanılan saf bitümün özgül ağırlık değeri bulunmuştur.

4.1.1.1. Bitüm özgül ağırlık deneyi

Bitüm özgül ağırlık deneyi, TS EN 15326+A1 ve ASTM D70 standartlarına uygun yapılmıştır. Bitüm özgül ağırlık deneyinin amacı, bitümün özelliklerini ve uygunluğunu belirlemek için birim hacim başına düşen kütlesinin hesaplanmasıdır. Bu durum bitümün yoğunluğunu ve performans özelliğini etkiler.

Deney iki adet 50 ml hacmindeki cam piknometre ile yapılır. Piknometreler temizlenir ve boş olarak hassas terazi ile tartılıp (W_p) not edilir.



(a) Cam piknometreler

(b) Boş piknometrenin tartımı

Şekil 4.1. Cam piknometreler ve boş piknometrenin tartımı

Piknometreler su ile doldurulup ağzı kapatılır ve dışı kurularak tekrar tartılıp (W_{p+s}) not edilir.



Şekil 4.2. Su dolu piknometrenin tartımı

Düşük sıcaklığa ayarlanmış etüvde, akışkan kıvama gelecek kadar ısıtılmış bitüm, huni yardımı ile piknometrelerin içerisine yarından biraz az olacak kadar doldurulur ve tartılıp (W_{p+b}) not edilir.



(a) Bitüm doldurulmuş piknometreler (b) Bitüm dolu piknometrenin tartımı
Şekil 4.3. Bitüm doldurulmuş piknometreler ve bitüm dolu piknometrenin tartımı

Piknometrenin içindeki bitümün buharlaşmaması için üzerine damıtılmış su doldurularak ağzı kapatılır. Piknometreler $25 \pm 0,5$ °C de olan su banyosunda 30 dakika bekletilir.



(a) Bitüm ve su doldurulmuş piknometreler (b) Su banyosunda bekletilen piknometreler
Şekil 4.4. Bitüm ve su doldurulmuş piknometreler ve su banyosunda bekletilmesi

Piknometrelerin su banyosunda bekletilme süresi bittikten sonra çıkarılıp dış kısmı kurulanır ve ayrı ayrı tartılıp (W_{p+s+b}) not edilir.



Şekil 4.5. Bitüm ve su doldurulmuş piknometrelerin su banyosundan sonra tartılması

Not edilen tartım sonuçları, aşağıda verilen (4.1) ve (4.2) formülleri kullanılarak iki numune için ayrı ayrı özgül ağırlık hesaplanır. İki numunenin özgül ağırlık ortalaması alınarak bitüm özgül ağırlığı bulunur.

$$G_{sb} = \frac{W_b}{(W_{p+s} - W_p) - (W_{p+s+b} - W_{p+b})} \quad (4.1)$$

$$W_b = W_{p+b} - W_p \quad (4.2)$$

Formüllerdeki; G_{sb} değeri bitümün özgül ağırlığını (g/cm^3), W_p değeri piknometrenin ağırlığını (g), W_{p+s} değeri piknometre + su ağırlığını (g), W_{p+b} değeri piknometre + bitüm ağırlığını (g), W_{p+s+b} değeri piknometre + su + bitüm ağırlığını (g), W_b değeri ise bitüm ağırlığını (g) göstermektedir.

4.1.1.2. Kullanılan saf bitüm özellikleri

Bu çalışmada kullanılan 70/100 penetrasyonlu saf bitümün özellikleri, geleneksel bitüm deneylerinden; penetrasyon, yumuşama noktası, parlama noktası ve özgül ağırlık deneyleri ile belirlenerek modifiye bitümle karşılaştırılabilmesi için Tablo 4.1'de verilmiştir.

Tablo 4.1. B 70/100 penetrasyonlu saf bitüm özellikleri

Yapılan Deneyler	Birim	B 70/100		
		Deney Standardı	Şartname Limitleri	Ölçülen Değerler
Penetrasyon	0,1 mm	TS EN 1426	70-100	82,50
Yumuşama Noktası	°C	TS EN 1427	43-51	45
Parlama Noktası	°C	TS EN 22719	min 230	304
Özgül Ağırlık	g/cm^3	TS EN 15326+A1	1,0-1,1	1,02

4.1.2. Agregas ve filler

Kullanılan agrega, kalker esaslı kırmataş agregası olup Karayolları 16. Bölge Müdürlüğü 164. Şube Müdürlüğü'nden temin edilmiştir.



Şekil 4.6. Çalışmada kullanılan agregalar

Kullanılacak agregaların fiziksel özellikleri tayini için agrega özgül ağırlık deneyleri yapılarak hacim özgül ağırlık, zahiri özgül ağırlık ve su emme oranları belirlenmiştir.

4.1.2.1. Kaba agrega özgül ağırlık deneyi

Kaba agrega özgül ağırlık deneyi; ASTM C127, AASHTO T 85-14 ve TS EN 1097-6 standartlarına uygun yapılmıştır. Kaba agrega özgül ağırlık deneyinin amacı, kaba agreganın fiziksel özelliklerini, yapı malzemelerinin tasarımı ve kalitesini belirlemek için birim hacim başına düşen kütlesinin hesaplanmasıdır. Kaba agregalar yapı malzemelerinin dayanıklılık, taşıma kapasitesi gibi özellikleri üzerinde çok etkilidir.

Bir numune için agrega karışımının 4,75 mm'lik eleğin üzerinde kalan kısmı olan 19-4,75 mm elekleri aralarındaki kaba agregalardan, kullanılan gradasyona göre agrega dane dağılımını temsil edecek şekilde 2 kg'lık iki tane numune hazırlanır.



(a) Tartılan 2 kg kaba agrega



(b) 2 adet deney numunesi

Şekil 4.7. Tartılan 2 kg kaba agrega ve 2 adet deney numunesi

Tartılan agregalar bir tepsiye konularak yıkanır ve agregaların üzerini su geçecek şekilde su ilave edilir. Agregalar 24 saat boyunca tepside su içerisinde bekletilir.



(a) Agregaların yıkanması



(b) Agregaların 24 saat su içinde bekletilmesi

Şekil 4.8. Agregaların yıkanması ve 24 saat su içinde bekletilmesi

24 saat sonunda agregalar süzgeç yardımıyla sudan çıkarılır ve kurutularak suya doymun yüzey kuru (W_{doymun}) hale getirilmiş halde tartılarak not edilir.



(a) Agregaların kurutulması



(b) Agregaların suya doymun yüzey kuru hali

Şekil 4.9. Agregaların kurutulması ve suya doymun yüzey kuru hali

Tel sepet kullanılarak, kaba agregalar numunelerinin üstünü 5 cm geçecek şekilde su doldurulur ve sepet içindeki agregalar su dolu kovaya daldırılır. Agregaların arasında hava boşluğu kalmaması için sepet birkaç defa sarsıldıktan sonra sudaki ağırlığı (W_{su}) tartılır.



Şekil 4.10. Agregaların sudaki ağırlığının tartılması

Tartımdan sonra, agregalar sepetten çıkarılıp kuruması için 110°C sıcaklığa ayarlanmış etüvde 24 saat bekletilir. 24 saat sonunda etüvden çıkarılıp havadaki kuru agregalar ağırlığı (W_{hava}) tartılır.



(a) Agregaların etüvde kurutulması



(b) Etüvde kurutulmuş agregaların tartımı

Şekil 4.11. Agregaların etüvde kurutulması ve kurutulmuş agregaların tartımı

Not edilen tartım sonuçları ile aşağıda verilen (4.3), (4.4), (4.5) ve (4.6) formülleri kullanılarak bir numune için kaba agrega hacim özgül ağırlık, zahiri özgül ağırlık, efektif özgül ağırlık ve su emme kapasitesi bulunur. İki numunenin ortalaması alınarak hesaplamalar yapılır.

$$G_{sb} = \frac{W_{hava}}{(W_{doygun} - W_{su})} \quad (4.3)$$

$$G_{sa} = \frac{W_{hava}}{(W_{hava} - W_{su})} \quad (4.4)$$

$$G_{se} = \frac{(G_{sb} + G_{sa})}{2} \quad (4.5)$$

$$S(\%) = \frac{(W_{doygun} - W_{hav})}{W_{hava}} \times 100 \quad (4.6)$$

Formüllerdeki; G_{sb} değeri kaba agreganın hacim özgül ağırlığını, G_{sa} değeri kaba agreganın zahiri özgül ağırlığını, G_{se} değeri kaba agreganın efektif özgül ağırlığını, $S(\%)$ değeri kaba agreganın su emme kapasitesini, W_{hava} değeri kaba agreganın havadaki kuru ağırlığını, W_{su} değeri kaba agreganın sudaki ağırlığını, W_{doygun} değeri ise kaba agreganın suya doymuş yüzey kuru ağırlığını göstermektedir.

4.1.2.2. İnce agrega özgül ağırlık deneyi

İnce agrega özgül ağırlık deneyi, ASTM C128, AASHTO T 84-13 standartlarına uygun yapılmıştır. İnce agrega özgül ağırlık deneyinin amacı, ince agreganın fiziksel özelliklerini, yapı malzemelerinin tasarımı ve kalitesini belirlemek için agreganın birim hacmindeki ağırlık miktarının aynı hacimdeki ve 25°C deki suyun ağırlığına oranı olarak hesaplanmasıdır. İnce agregalar dayanıklılık, taşıma kapasitesi gibi özellikleri üzerinde çok etkilidir.

Bir numune için agrega karışımının 0,075 mm'lik eleğin üstünde kalan kısmı olan 2-0,075 mm elekleri aralarındaki ince agregalardan, kullanılan gradasyona göre agrega dane dağılımını temsil edecek şekilde 1 kg'lık iki numune hazırlanır, deney sonunda verilerin ortalaması alınır.



(a) Gradasyona uygun ince agrega tartılması (b) Uygun oranlarda tartılan ince agregalar



(c) Tartılan 1 kg ince agrega

(d) 2 adet deney numunesi

Şekil 4.12. Gradasyona uygun tartılan 2 tane 1 kg'lık ince agrega numuneleri

Tartılan agregalar bir tepsiye konularak agregaların üzerini geçecek kadar su doldurulur ve 24 saat boyunca su içerisinde bekletilir. 24 saatin sonunda tepsideki fazla su dökülür.



(a) Agregaların üstüne su eklenmesi

(b) Agregaların 24 saat suda bekletilmesi

Şekil 4.13. Agregaların üstüne su eklenmesi ve 24 saat su içinde bekletilmesi

24 saat sonunda suyun içinden çıkarılan numuneler sıcak hava kaynağı kullanılarak suya doymun yüzey kuru (W_{doymun}) hale getirilmiş halde tartılarak not edilir. Suya doymun yüzey kuru hal koni metodu kullanılarak bulunur. Metal koni kalıp içerisindeki numunelere her defasında 25 vuruş yapılır ve 3 tabaka olacak şekilde sıkıştırılır. Sıkıştırılan agregalar koninin ters çevrilmesiyle tepsiye bırakılır. İnce kesitli mala yardımı ile agregaya yığılını iki parçaya ayrılır. Agregalar kendini tutuyorsa yani yıkılmıyorsa kurutma işlemi devam eder, agregalar kendini bırakıyorsa suya doymun yüzey kuru hale gelmiş demektir.



(a) Sıcak hava kaynağı ile kurutma



(b) Koni metodu

Şekil 4.14. Agregaların sıcak hava kaynağı ile kurutulması ve koni metodu

Suya doymun yüzey kuru hal sağlandıktan sonra piknometre aşamasına geçilir. İki adet piknometre temizlenip kurulandıktan sonra boş ağırlıkları (W_p) ölçülür. Piknometre çizgisine kadar saf su eklenir ve tartılarak ağırlığı (W_{p+s}) belirlenir. Piknometre boşaltılıp, kuruması için etüve konur. Piknometre kuruduktan sonra numuneler huni yardımı ile piknometreye boşaltılır ve ağırlığı (W_{p+a}) ölçülür.



(a) Su dolu piknometrenin tartımı



(b) İnce agregaya dolu piknometrenin tartımı

Şekil 4.15. Su dolu piknometrenin tartımı ve ince agregaya dolu piknometrenin tartımı

Daha sonra numunenin üstüne su ilave edilir, boşluk kalmaması için sarsılarak tamamen su doldurulur ve peçete yardımı ile üzerinde oluşan köpük alınır. Bu şekilde tekrar tartılıp ağırlığı (W_{p+a+s}) not edilir.



Şekil 4.16. Su ve ince agrega dolu piknometrenin tartımı

Tartımdan sonra numune piknometreden bir tepsiye boşaltılır, kayıp olmaması için piknometre su ile çalkalanarak tepsiye ilave edilir ve kuruması için tepsi etüve atılır. Kuruma işlemi sonrasında kuru agrega (W_{hava}) tartılır.



(a) İnce agreganın etüvde kurutulması (b) Kurumuş ince agreganın tartımı

Şekil 4.17. İnce agreganın etüvde kurutulması ve kurumuş agreganın tartılması

Not edilen tartım sonuçları ile aşağıdaki verilen (4.7), (4.8), (4.9) ve (4.10) formülleri kullanılarak her bir numune için ayrı ayrı ince agrega hacim özgül ağırlık, zahiri özgül ağırlık, efektif özgül ağırlık ve su emme kapasitesi bulunur.

$$G_{sb} = \frac{W_{hava}}{(W_{p+s} + W_{doygun} - W_{p+a+s})} \quad (4.7)$$

$$G_{sa} = \frac{W_{hava}}{(W_{p+s} + W_{hava} - W_{p+a+s})} \quad (4.8)$$

$$G_{se} = \frac{G_{sb} + G_{sa}}{2} \quad (4.9)$$

$$S(\%) = \frac{(W_{doygun} - W_{hava})}{W_{hava}} \times 100 \quad (4.10)$$

Formüllerdeki; G_{sb} değeri ince agreganın hacim özgül ağırlığını, G_{sa} değeri ince agreganın zahiri özgül ağırlığını, G_{se} değeri ince agreganın efektif özgül ağırlığını, $S(\%)$ değeri ince agreganın su emme kapasitesini, W_{hava} değeri ince agreganın havadaki kuru ağırlığını, W_{doygun} değeri agreganın suya doymuş yüzey kuru ağırlığını, W_{p+s} değeri piknometre + su ağırlığını, W_{p+a+s} değeri ise piknometre + ince agrega + su ağırlığını göstermektedir.

4.1.2.3. Filler özgül ağırlık deneyi

Filler özgül ağırlık deneyi, ASTM C854 ve TS EN 1097-7 standartlarına uygun yapılmıştır. Filler özgül ağırlık deneyinin amacı, belirli bir sıcaklıkta agreganın geçirimsiz boşluklarını içeren bitüm hacminin havadaki ağırlığının, aynı sıcaklık ve hacimdeki suyun ağırlığına oranı hesaplanarak zahiri özgül ağırlığın bulunmasıdır. Filler, karışım içindeki boşlukları doldurup agregalar arasında daha çok temas noktası oluşturup daha yoğun karışım elde edilmesini sağlar.

Bir numune için 0,075 mm'lik elekten geçen agregadan 100 gram tartılır. Bu şekilde iki numune hazırlanır, deney sonunda verilerin ortalaması alınır.



(a) Tartılan 100 gram filler



(b) 2 adet filler deney numunesi

Şekil 4.18. Tartılan 100 gram filler ve 2 adet filler deney numunesi

İki adet piknometre temizlenip kurulandıktan sonra boş ağırlıkları (W_p) ölçülür.



(a) Cam piknometreler



(b) Boş piknometrenin tartımı

Şekil 4.19. Cam piknometreler ve boş piknometrelerin tartımı

Piknometre çizgisine kadar saf su eklenir ve tartılarak ağırlığı (W_{p+s}) belirlenir. Piknometre boşaltılıp, kuruması için etüve konulur.



Şekil 4.20. Su dolu piknometre tartımı

Piknometreler kuruduktan sonra, numuneler huni yardımı ile piknometreye boşaltılır ve ağırlığı (W_{p+a}) ölçülür.



Şekil 4.21. Filler dolu piknometre tartımı

Daha sonra numune üzerine su ilave edilir, boşluk kalmaması için sarsılarak tamamen su doldurulur ve peçete yardımı ile üzerinde oluşan köpük alınır. Bu şekilde tekrar tartılıp ağırlığı (W_{p+a+s}) not edilir.



(a) Filler ve su dolu piknometreler (b) Filler ve su dolu piknometre tartımı

Şekil 4.22. Filler ve su dolu piknometreler ve tartımı

Tartımdan sonra numuneler piknometreden bir tepsiye boşaltılır, kayıp olmaması için piknometre su ile çalkalanarak tepsiye ilave edilir ve kuruması için tepsi 110°C sıcaklıktaki etüve atılır.



(a) Numunelerin tepsiye boşaltılması (b) Numunelerin etüvde kurutulması

Şekil 4.23. Numunelerin tepsiye boşaltılması ve etüvde kurutulması

Kuruma işlemi sonrasında kuru agrega ağırlığı (W_{hava}) tartılır.



(a) Etüvde kurumuş filler numuneleri (b) Kurumuş filler numunesinin tartımı

Şekil 4.24. Etüvde kurumuş filler numuneleri ve kurumuş filler numunesinin tartımı

Not edilen tartım sonuçları ile aşağıda verilen (4.11) formülü kullanılarak her bir numune için zahiri özgül ağırlık hesaplanır.

$$G_{sa} = \frac{W_{hava}}{((W_{p+s} - W_p) - (W_{p+a+s} - W_{p+a}))} \quad (4.11)$$

Formüldeki; G_{sa} değeri fillerin zahiri özgül ağırlığını, W_{hava} değeri fillerin havadaki kuru ağırlığını, W_p değeri piknometre ağırlığını, W_{p+s} değeri piknometre + su ağırlığını, W_{p+a} değeri piknometre + filler ağırlığını, W_{p+a+s} değeri ise piknometre + filler + su ağırlığını göstermektedir.

4.1.2.4. Kullanılan agreg ve fillerin fiziksel özellikleri

Çalışmada kullanılan agreg ve fillerin fiziksel özellikleri, gerek duyulan deneylerle bulunup sonuçları Tablo 4.2’de verilmiştir.

Tablo 4.2. Agreg ve fillerin fiziksel özellikleri

Deneyler	Kaba Agreg	İnce Agreg	Filler
Hacim Özgöl Ağırlık (g / cm ³)	2,654	2,477	-
Zahiri Özgöl Ağırlık (g / cm ³)	2,674	2,540	2,717
Su Emme (%)	0,280	1,000	-

4.1.2.5. Gradasyon

Bitümlü karışımların boşluk oranının düşük olması ve yüksek stabilitede olabilmesi için agreg gradasyonunun iyi ayarlanması gerekmektedir. Agreg gradasyonuna uygun agregalar elek analizi ile hazırlanmıştır.



(a) Agregaların elek analizi



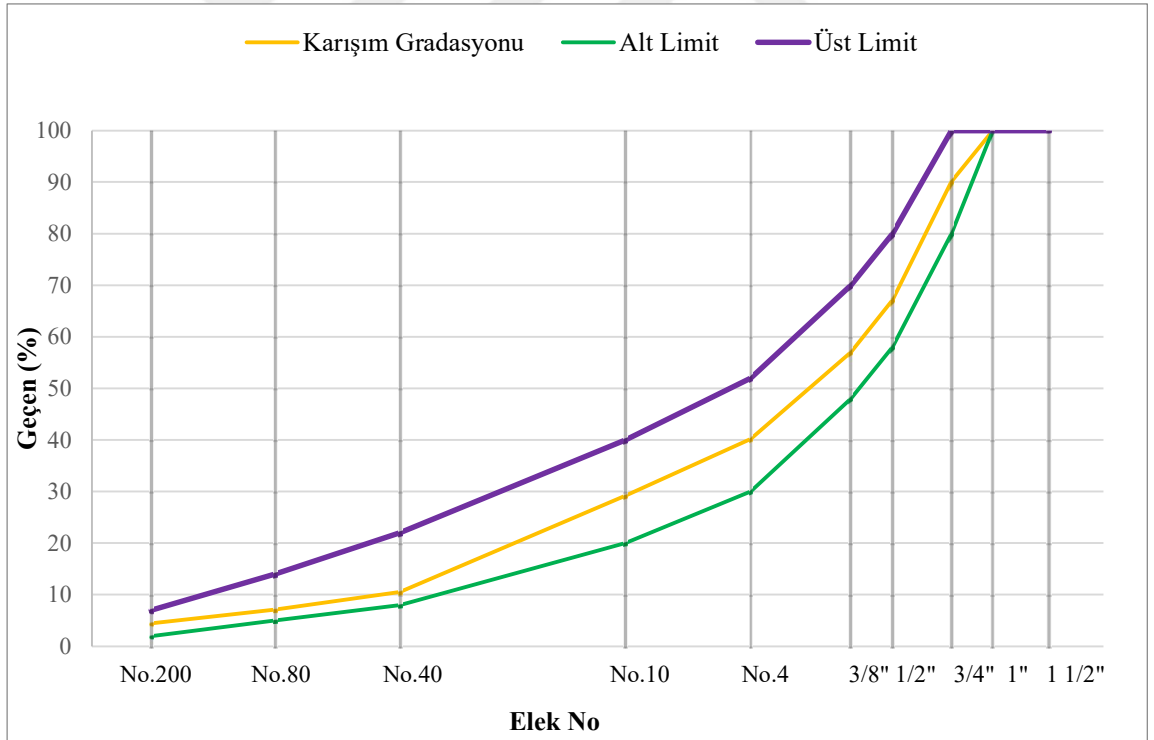
(b) Gradasyona uygun elenmiş agregalar

Şekil 4.25. Agregaların elek analizi ve gradasyona uygun elenmiş agregalar

Karışımlarda kullanılacak agregalar elek analizi ile bütün eleklerden ayrı ayrı elendikten sonra Karayolları Teknik Şartname sınırlarına uygun olacak şekilde, aşağıda verilen Tablo 4.3 ve Şekil 4.26’daki gibi gösterilen gradasyon elde edilmiştir.

Tablo 4.3. Kullanılan agrega gradasyonunun elek analizi

Elek Açıklığı		Geçen %	Binder Şartname Limitleri	
mm	inch			
37,50	1 1/2"	100	100	100
25,40	1"	100	100	100
19,10	3/4"	90,0	80	100
12,70	1/2"	67,1	58	80
9,52	3/8"	57,0	48	70
4,76	No.4	40,2	30	52
2,00	No.10	29,2	20	40
0,42	No.40	10,5	8	22
0,177	No.80	7,1	5	14
0,075	No.200	4,5	2	7



Şekil 4.26. Karışımın gradasyon eğrisi

4.1.3. Grafen Nanoplatelet (GNP)

Katkı maddesi olarak Nanografi Nano Teknoloji firmasından temin edilen siyah renkli, kokusuz ve toz halinde bulunan Grafen Nanoplatelet (GNP) kullanılmıştır. Modifiye bitüm hazırlanırken saf bitümün ağırlığının %0,35; %0,70; %1 oranlarında GNP kullanılmıştır.



(a) Grafen nanoplatelet dıştan görünümü

(b) Grafen nanoplatelet

Şekil 4.27. Grafen nanoplateletler katkı maddesi ve dıştan görünümü

Çalışmada kullanılan GNP'nin özellikleri Tablo 4.4'te verilmiştir.

Tablo 4.4. Grafen nanoplateletlerin özellikleri

Renk	Siyah
Koku	Kokusuz
Maddenin Hali	Katı (Toz)
Saflık	% 99,9
Ortalama Kalınlık	3-8 nm
Çap	1,5 µm
Yüzey Alanı	530 m²/g

4.2. Yöntem

Çalışmanın bu bölümünde, bitümlü sıcak karışımlarda kullanılan 70/100 saf bitüm ve GNP katkı maddesi ile modifiye edilen bitüm özelliklerinin belirlenmesi için yapılan deneyler ve yöntemler anlatılmıştır.

4.2.1. Bitüm modifikasyonu

GNP modifiyeli BSK'nın performansını, fiziksel, kimyasal, mekanik ve morfolojik özelliklerini incelemek için farklı oranlarda GNP kullanılarak, farklı sıcaklık, hız ve sürelerde Şekil 4.28'de görülen High Shear Mixer'de karıştırılarak bitüm modifiye edilmiştir. GNP modifiyeli BSK'larda katkı oranı, karıştırma hızı, karıştırma süresi ve karıştırma sıcaklığı olmak üzere dört parametre ve dörder seviye kullanılmıştır. Deney tasarımı için kullanılacak Taguchi Metodu ile L16 ortogonal dizisindeki 4 parametre ve 4 seviye dikkate alınarak laboratuvar ortamında 16 farklı karışım hazırlanmıştır. Karışımlar hazırlandıktan sonra bitüm ve bitümlü karışım deneyleri yapılmıştır.



Şekil 4.28. High Shear Mixer

Modifiye bitümlü sıcak karışımların fiziksel ve mekanik özelliklerini belirlemek için penetrasyon, yumuşama noktası, parlama noktası ve RTFOT deneyleri; yorulma dayanımını belirlemek için elastik geri dönme deneyi; GNP'nin bitümün performans özellikleri üzerindeki etkisini belirlemek için Marshall tasarım yöntemi; kimyasal ve morfolojik özelliklerini belirlemek için FT-IR analizi yapılmıştır.

256 deney tahmininin yorumlanması ile en uygun parametre ve seviyelere karar verilerek, deneysel süreçlerin optimize edilmesi zamandan ve ekonomiden tasarruf edilerek parametrelerin optimumunu belirlemek için Taguchi deneysel tasarım yöntemi; ve en sonunda parametrelerin her bir deney için optimum olan seviyeleri tek optimuma indirerek dört parametrenin optimum seviyelerini belirlemek için çoklu yanıt performans indeksi (MRPI) optimizasyonu yapılmıştır.

Bitüm modifikasyonu için kullanılan parametreler ve seviyeler Tablo 4.5' te ve deney planını oluşturan L16 ortogonal dizisi Tablo 4.6' da verilmiştir.

Tablo 4.5. Deney parametreleri ve seviyeleri

Parametre	Seviye			
	1	2	3	4
GNP Oranı (%)	0,00	0,35	0,70	1,00
Karıştırma Sıcaklığı (°C)	145	160	175	190
Karıştırma Süresi (dakika)	15	30	45	60
Karıştırma Hızı (rpm)	1000	2000	3000	4000

Tablo 4.6. Deney planı

Deney No	GNP (%)	Sıcaklık (°C)	Süre (dakika)	Hız (rpm)
1	0,00	145	15	1000
2	0,00	160	30	2000
3	0,00	175	45	3000
4	0,00	190	60	4000
5	0,35	145	30	3000
6	0,35	160	15	4000
7	0,35	175	60	1000
8	0,35	190	45	2000
9	0,70	145	45	4000
10	0,70	160	60	3000
11	0,70	175	15	2000
12	0,70	190	30	1000
13	1,00	145	60	2000
14	1,00	160	45	1000
15	1,00	175	30	4000
16	1,00	190	15	3000

4.2.2. Modifiye bitümün karıştırılması

Türkiye Nanografi Nano Teknoloji firmasından temin edilen GNP katkı malzemesi ile 70/100 penetrasyonlu saf bitüm parametre ve seviyelere göre High Shear Mikser’ de karıştırılarak bitümlü sıcak karışım asfalt hazırlanmıştır.

Saf bitümler 25°C sıcaklıkta bitüm tenekesinden katı bir şekilde çıkarılmış ve katı durumdaki ağırlıkları ölçülmüştür. Tartılan bitüm ağırlığına göre Tablo 4.6’ da verilen oranlara göre GNP katkı maddesinin ağırlıkları hesaplanmıştır.



(a) Uygun miktarda tartılan bitüm



(b) Bitüm ağırlığına göre tartılan GNP

Şekil 4.29. Karışıma uygun miktarda bitüm ve ağırlığınca GNP’nin tartılması

Ağırlığı belirlenen saf bitüm, seviyelere göre sıcaklığı önceden ayarlanan High Shear Mikserin içerisine konulmuştur. Katkı maddesi olan GNP, seviyelere ve bitümün ağırlığına göre önceden hesaplanmış miktarda tartılarak kademeli olarak miksera yani bitümün içerisine eklenmiştir. GNP malzemesi çok hafif olduğundan ve mikserin hızına bağlı olarak kayıp olmaması için önce manuel şekilde cam bir çubukla yavaşça birkaç dakika karıştırılmıştır. Daha sonra mikserde, seviyelere göre belirlenen hızlarda ve sürelerde karıştırılmıştır.



(a) GNP'nin mikserde bitüme eklenmesi (b) GNP'nin cam çubuk ile karıştırılması
Şekil 4.30. GNP'nin mikserde bitüme eklenmesi ve cam çubuk ile karıştırılması

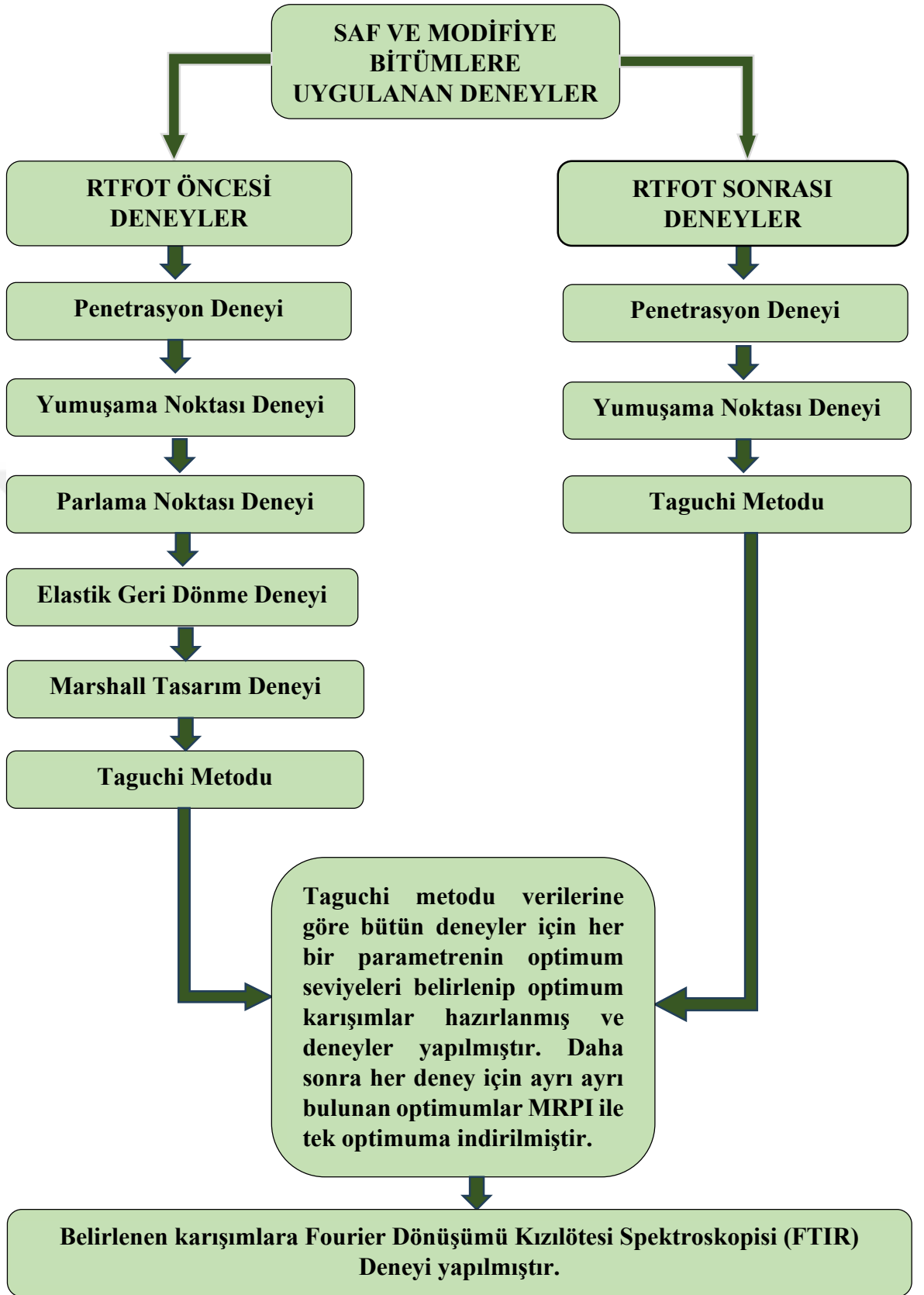
Tablo 4.6'da belirtilen 16 adet deney numunesi sırasıyla hazırlanmıştır. Belirtilen sürede karışımı tamamlanan numuneler mikserden alınıp deneyler için uygun alüminyum kaplara ve beherlere konulmuş ve etiketlenmiştir. Oluşturulan modifiye bitümlü sıcak karışımlara penetrasyon deneyi, yumuşama noktası deneyi, parlama noktası deneyi, elastik geri dönme deneyi ve RTFOT deneyi yapılmıştır. RTFOT ile yaşlandırılmış numunelere tekrardan penetrasyon ve yumuşama noktası deneyi yapılmıştır. Marshall tasarım deneyi ve yapılacak olan diğer deneyler için numuneler ayrılarak yedekleri alınmıştır.



Şekil 4.31. Hazırlanmış GNP katkılı modifiye bitümler

4.2.3. Saf bitüm ve modifiye bitümlere uygulanan deneyler ve yöntemler

Saf bitüm ile modifiye bitümlere uygulanan deneyler Şekil 4.32'deki akış şemasında verilmiştir.



Şekil 4.32. Saf ve modifiye bitümlere uygulanan deneylerin akış şeması

4.2.3.1. Penetrasyon deneyi

Penetrasyon deneyi, TS EN 1426 ve ASTM D5 standartlarına uygun yapılmıştır. Penetrasyon deneyinin amacı, bitümün kıvamını (sertliğini) dolayısıyla bağlayıcılık özelliğini belirlemektir. Penetrasyon değeri ile kıvam arasında ters bir orantı vardır. Penetrasyon değeri azaldıkça sertlik ve kıvam artar böylece bağlayıcılığı artar, penetrasyon değeri arttıkça bitüm yumuşar ve daha akışkan olur. Penetrasyon kelimesinin anlamı batma ve içe girme olarak tanımlanır. Standart deney iğnesinin sabit 100 gramlık yük altında belirli bir süre içerisinde 25°C sıcaklıkta dikey olarak serbest bırakılarak bitüme batması ile cihaz tarafından ölçülen batma miktarı penetrasyon değerini vermektedir.



Şekil 4.33. Kapalı ve açık durumdaki penetrasyon deney cihazı

Saf bitüm, yumuşama noktasını geçmeyecek şekilde yani maksimum 90°C'yi geçmeyecek sıcaklıkta etüvde ısıtılarak erimesi sağlanır, modifiye bitümler ise mikserden alınır ve hava kabarcığı kalmayacak şekilde penetrasyon kabına dökülerek oda sıcaklığında 60-90 dakika kadar soğumaya bırakılır. Numune soğuduktan sonra 60-90 dakika, 25°C sıcaklığa ayarlanmış su banyosunda bekletilir.



(a) Penetrasyon deney numunesi (b) Numunenin su banyosunda bekletilmesi

Şekil 4.34. Penetrasyon deney numunesi ve numunenin su banyosunda bekletilmesi

Bu sırada penerometre cihazına yerleştirilecek iğnenin temizliği kontrol edilir ve cihazdaki vida ile sıkılarak takılır. Su banyosunda süresi dolan numune, numunenin soğumaması için 25°C su ile beraber taşıma kabına alınarak zaman kaybetmeden penetrometre cihazının içine yerleştirilir. Önceden cihaza takılan iğnenin ucu, numunenin yüzeyine uç uca temas edecek ama numuneye batmayacak şekilde ayarlanır ve cihaz sıfırlanır. İğne 5 saniye süre ile serbest bırakılır ve ilk değer okunmuş olur.



Şekil 4.35. Penetrasyon değerlerinin okunması

Daha sonra cihaz uyarısı ile iğne yukarı kaldırılır ve çıkarılıp hızlıca yeni iğne takılır. Bu işlem numune üzerinde kabın kenarına 10 mm'den daha yakın olmayan noktalardan ve kenarları ortalama 10 mm uzunluğunda olan bir eşkenar üçgen oluşturacak şekilde üç farklı noktadan tekrarlanır.

Yapılan okumaların geçerli olması için ölçülen değerler arasındaki en büyük fark aşağıda verilen Tablo 4.7’deki değerlerden büyük olmamalıdır, büyük olursa yeni bir numune ile deney tekrarlanır.

Tablo 4.7. Penetrasyon değerleri arasında olabilecek en büyük farklar

Penetrasyon Değeri	≤ 49	50-149	150-249	≥ 250
Maksimum Penetrasyon Farkı	2	4	6	8

Cihazda 0,1 mm’lik batma değeri 1 penetrasyon değerine eşit olacak şekilde hesaplanır. Okunan üç değerın ortalaması alınarak penetrasyon değeri belirlenir. Örneğin okunan ortalama değeri 70 ise bitümün penetrasyonu 70 demektir; yani iğne asfaltın içine 70 mm batmış demektir. Ayrıca değeri 70 ile 100 arasında herhangi bir sayı ise bitüm sınıfı 70/100 demektir. Bitümler penetrasyon değerlerine göre sınıflandırılarak iklim şartlarına göre kullanılırlar. Penetrasyon değeri aynı olan iki bitümden, yumuşama noktası yüksek olan sıcaklığa karşı daha dayanıklıdır. Penetrasyon deneyi, RTFOT öncesi ve RTFOT sonrası tüm numunelere yapılmıştır.

4.2.3.2. Yumuşama noktası deneyi

Yumuşama noktası deneyi, TS EN 1427 ve ASTM D36 standartlarına uygun yapılmıştır. Yumuşama noktası deneyinin amacı; bitümün kıvamlılığını, sıcaklık karşısında nasıl davrandığı ve standartlara göre belirlenen yük altında katı halden işlenebilir bir akışkanlığa geçtiği sıcaklık değerini bulmaktır. Yumuşama noktası değeri; viskozite değeri ile doğru orantılı, penetrasyon değeri ile ters orantılıdır.

Saf bitüm etüvde ısıtılarak, modifiye bitümler ise mikserden alınarak; bitümün üzerine yapışmasını engellemek için az miktarda vazelin sürülen cam sehpa üzerine bırakılan 2 adet pirinç halkasına, halkanın üst kısmını biraz aşacak şekilde dökülür ve soğuması için oda sıcaklığında bekletilir. Bitüm soğuyup sertleştikten sonra ısıtılmış bir spatula ile fazlalıklar alınarak tepe noktası düz hale getirilip deney düzeneğine yerleştirilir. Pirinç halkalar üzerine 3,5 gram ağırlığındaki birer çelik bilye konulur ve cihaza ait, içerisinde saf su bulunan cam behere koyularak deney başlatılır.



(a) Yumuşama noktası deney numunesi (b) Numunenin cihaza yerleştirilmesi
Şekil 4.36. Yumuşama noktası deney numunesi ve numunenin cihaza yerleştirilmesi

Su, 3 dakika boyunca 5°C sıcaklıkta sabit tutulur ve daha sonra dakikada 5°C sıcaklık artırılacak şekilde ısı verilir. Beher içerisinde, homojen bir sıcaklık sağlamak amacıyla dönen mıknatıslı özelliğe sahip bir çubuk vardır. Bilyelerin ağırlığı ve artan sıcaklığın etkisiyle bitümde yumuşama olur. Bilyeler bitümle kaplı olacak şekilde ayrı ayrı olarak pirinç halkaların içerisinde geçerek deney setinin 25 mm mesafedeki tabanına temas edene kadar devam eder ve temasın gerçekleştiği anda cihazın ekranında gözüken sıcaklık değerleri okunur. İki değer arasındaki fark; 80°C sıcaklık altındaki değerler için 1°C , 80°C sıcaklık üstündeki değerler için 2°C 'yi geçmesi halinde deney tekrar edilir (Karacasu, 2016). Okunan iki değerın ortalaması yumuşama noktası değerini verir.



(a) Yumuşama noktası deneyi (b) Bitüm kaplı bilyelerin düşmesi

Şekil 4.37. Yumuşama noktası deneyinin başlaması ve bitüm kaplı bilyelerin düşmesi

4.2.3.3. Penetrasyon indeksi

Bitümün ısıya karşı hassasiyeti; karışım hazırlama sürecinde kullanılan enerji ve süre bakımından, uygulama sürecinde ise düşük sıcaklıkta ısıl çatlak oluşumu ve yüksek sıcaklıkta kalıcı deformasyon oluşumu bakımından çok önemlidir. Penetrasyon indeksi (PI), bitümün ısı duyarlılığını değerlendirmek için kullanılmaktadır. PI, penetrasyon ve yumuşama noktası deneylerinden elde edilen sonuçlarla aşağıda gösterilen (4.12) ve (4.13) formülleri kullanılarak hesaplanıp değerlendirilmektedir (Ullidtz, 1987).

$$A = \frac{\log_{10}800 - \log_{10}P_{25}}{T_{SP} - 25} \quad (4.12)$$

$$PI = \frac{20 - 500A}{1 + 50A} \quad (4.13)$$

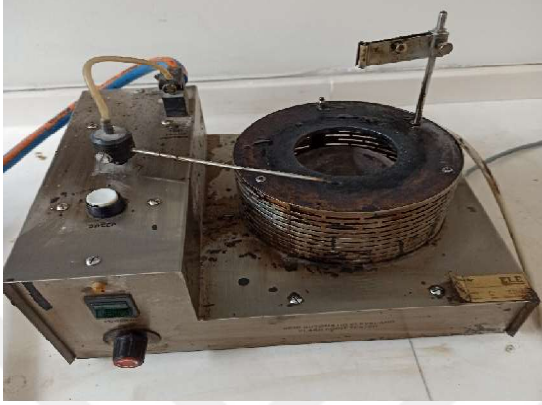
Formüllerdeki; P_{25} değeri bitümün 25 °C'deki penetrasyon değerini, T_{SP} değeri ise yumuşama noktası değerini göstermektedir.

PI değerinin; -2'den küçük olması durumunda bitümün yüksek ısı duyarlılığına sahip olduğu, 2'den büyük olması durumunda ise bitümün düşük ısı duyarlılığına sahip olduğunu göstermektedir (Geçkil, 2019). Kısacası bitümlü bağlayıcılarda PI değeri arttıkça sıcaklık duyarlılığı azalmaktadır. PI değerinin yüksek olması bitümlü karışımların düşük sıcaklıklarda çatlama ve kalıcı deformasyonlara karşı daha dirençli olduğu belirtilmiştir (Firoozifar vd., 2011).

4.2.3.4. Parlama noktası deneyi

Parlama noktası deneyi, TS EN 22719 ve TS 1171 standartlarına uygun yapılmıştır. Parlama noktası deneyinin amacı; iş sağlığı ve güvenliği açısından yapılacak yol yapım çalışmalarında, bitümün ısıtıldığı zamanlarda oluşabilecek tutuşma ve alev alma riski karşısında önlem alabilmek için bitümün alevle teması sonucunda geçici olarak parladığı fakat sürekli yanmanın olmadığı en düşük sıcaklık derecesini bulabilmek için bitümün parlama noktası ve yanma derecesini öğrenmektir.

Saf bitüm akışkan olana kadar belirli bir sıcaklıkta (tahmin edilen parlama noktasının 56°C altına kadar) etüvde ısıtılarak, modifiye bitümler ise mikserden alınarak parlama noktası deney kabının çentikli kısmına kadar, yüzeyinde hava kabarcığı olmayacak şekilde doldurularak cihaza yerleştirilir.



(a) Parlama noktası deneyi cihazı



(b) Parlama noktası deney kabı

Şekil 4.38. Parlama noktası deney cihazı ve deney kabı

Deney başlangıcında, parlama noktasının sıcaklık değerine yaklaşılan kadar sıcaklık hızı dakikada 5°C ile 17°C arasında artırılır. Tahmin edilen parlama noktası sıcaklığına yaklaşıncı dakikada 5°C ile 6°C arası sıcaklık artışı yapılmalıdır. Parlama anında sıcaklık değeri not edilir ve bu sıcaklık değeri parlama noktasını verir.



(a) Parlama noktası deneyinin yapılışı



(b) Bitümün parlama anı

Şekil 4.39. Parlama noktası deneyinin yapılışı ve bitümün parlama anı

4.2.3.5. Elastik geri dönme deneyi

Elastik geri dönme deneyi, TS EN 13398 standardına uygun yapılmıştır. Elastik geri dönme deneyinin amacı bitümün yorulma dayanımını bulmaktır.



Şekil 4.40. Elastik geri dönme deney cihazı

Saf bitüm, akışkan olana kadar belirli bir sıcaklıkta etüvde ısıtılarak; modifiye bitümler ise mikserden alınarak, bitümün yapışmasını engellemek için önceden yağlanan ve vida ile birbirine tutturulup taban plakasına yerleştirilen üç adet pirinçten yapılmış, $10,0 \pm 0,1$ mm kalınlığında elastik geri dönme deney kalıplarına doldurulur. Bitüm ile doldurulmuş kalıplar 60 dakika boyunca 25°C de oda sıcaklığında bekletildikten sonra ısıtılmış spatula ile fazla bitüm alınarak yüzeyi düzleştirilir. Sonrasında üç kalıp 90 dakika boyunca 25°C 'lik su banyosunda bekletilir.



Şekil 4.41. Elastik geri dönme deney numuneleri

Daha sonra kalıpların taban plakası çıkarılarak düktilite cihazına yerleştirilir. Cihaza yerleştirilen kalıplar 50 mm/dakika hızla 200 mm uzatılarak ortadan kesilir ve iki tane yarım iplik elde edilir. 30 dakika sonrasında kesilen yarım ipliklerin uçları birleştirilerek aralarındaki mesafe mm cinsinden ölçülür.



(a) Numunelerin çekilmesi (b) Numunelerin kesilmesi (c) Numunelerin geri dönmesi

Şekil 4.42. Elastik geri dönme numunelerinin çekilmesi, kesilmesi ve geri dönmesi

Ölçülen bu değerler aşağıda verilen (4.14) formülü kullanılarak elastik geri dönme değeri hesaplanır.

$$R_E = \frac{d}{L} \times 100 \quad (4.14)$$

Formüldeki; R_E değeri elastik geri dönme değerini, d değeri yarım iplikler arasındaki uzaklığı (mm), L değeri ise germe uzunluğu olan 200 mm'yi göstermektedir. Elastik geri dönme değerleri arasındaki fark %5' ten fazla değilse ortalamaları alınarak bir değer elde edilir.

4.2.3.6. Dönel ince film ısıtma kaybı (RTFOT) deneyi

Dönel ince film ısıtma kaybı (RTFOT) deneyi, TS EN 12607-1 standardına uygun yapılmıştır. RTFOT deneyinin amacı, saf ve katkı ile modifiye edilmiş bitümlerden elde edilen BSK'nın, üretilmesi ve yapımı sırasında meydana gelen yaşlanma ve sertleşmenin, hava ve sıcaklığın birlikte etki ettirilmesi ile laboratuvar ortamında uyarlanıp, kısa bir süre yaşlandırılma sonrasındaki fiziksel özelliklerin (penetrasyon, yumuşama noktası gibi) üzerindeki değişikliklerin değerlendirilmesi ve kütle kaybının bulunmasıdır.

Karıştırma işlemi sırasında bitümde ortaya çıkan yaşlanma, laboratuvarda RTFOT deneyi ile simüle edilmektedir.



(a) RTFOT deney cihazı



(b) RTFOT deney cihazının içi

Şekil 4.43. RTFOT deney cihazı ve deney cihazının içi

Deney cihazı içinde bulunan dönel tabladaki sekiz adet numune bölümüne yerleştirilecek, sekiz adet boş cam şişe temizlenerek boşken ağırlıkları tartılır ve not edilir. Saf bitüm, akışkan olana kadar belirli bir sıcaklıkta etüvde ısıtılarak; modifiye bitümler ise mikserden alınarak, sekiz adet boş şişeye 35 gram doldurulur ve şişeler tekrar hassas terazi yardımıyla tartılarak not edilir.



(a) Boş RTFOT deney şişeleri



(b) 35 g bitüm konulmuş RTFOT deney şişeleri

Şekil 4.44. Boş ve 35 gram bitüm konulmuş RTFOT deney şişeleri

Sonrasında, şişeler önceden $163 \pm 0,5$ °C sıcaklığa ayarlanmış cihazdaki dönel tablaya yerleştirilir ve kapağı kapatılarak deney başlatılır. Numunelerin yerleştirildiği tabla $163 \pm 0,5$ °C’de sıcaklıkta dairesel olarak 15 devir/dakika hızla 85 dakika boyunca döner.

Dönme sırasında kompresör ile şişelerin içine $4\pm0,2$ l/dk değerinde basınçlı hava püskürtülür. Deney süresi bitene kadar; dönme hareketi, sıcaklık ve üflenen havanın etkisi ile bitüm, bütün şişelerin iç yüzeyini kaplayacak şekilde 1,25 mm kalınlığında film halinde durmadan hareket eder böylece yaşlanma gerçekleşir.



Şekil 4.45. 35 gram bitüm konulmuş RTFOT deney şişelerinin cihaza yerleştirilmesi

Deney süresi bittikten sonra, şişeler RTFOT cihazından çıkarılır ve en son ki ağırlıkları ölçülüp not edilir. Altı tane numune dolu şişe, bitümün yaşlandırma sonrası fiziksel özelliklerinden; penetrasyon ve yumuşama noktası deneyleri için kullanılır. Diğer iki numune dolu şişe ise 60 dakika oda sıcaklığında soğutularak tekrardan tartılır ve kütle kaybı hesabı için kullanılır.



Şekil 4.46. RTFOT sonrası kütle kaybı hesabı için soğumaya bırakılan numuneler

Aşağıda verilen (4.15) formülü kullanılarak kütle değişim yüzdesi hesaplanır ve ortalamaları alınarak kütle değişimi bulunur.

$$\text{Kütle Değişim Yüzdesi} = 100 \times \frac{(M_2 - M_1)}{(M_1 - M_0)} \quad (4.15)$$

Formüldeki; M_0 değeri boş kabın ağırlığını (g), M_1 değeri deneyden önce cam şişe ve 35 gram numune ağırlığı (g), M_2 değeri ise deneyden sonra cam şişe ve numune ağırlığını (g) göstermektedir.

RTFOT deneyi öncesi ve sonrasında kullanılan bitümün, 25 °C de penetrasyon oranı aşağıda verilen (4.16) formülü ile hesaplanır.

$$\text{Penetrasyon Oranı (\%)} = \frac{P_2}{P_1} \times 100 \quad (4.16)$$

Formüldeki; P_1 değeri RTFOT öncesi penetrasyon değerini (0,1 mm), P_2 değeri ise RTFOT sonrası penetrasyon değerini (0,1 mm) göstermektedir.

RTFOT deneyi öncesi ve sonrasında kullanılan bitümün, yumuşama noktasındaki artış aşağıda verilen (4.17) formülü ile hesaplanır.

$$\text{Yumuşama Noktasındaki Artış} = T_2 - T_1 \quad (4.17)$$

Formüldeki; T_1 değeri RTFOT öncesi yumuşama noktası değerini (°C), T_2 değeri ise RTFOT sonrası yumuşama noktası değerini (°C) göstermektedir.

4.2.3.7. Marshall tasarım deneyi

Marshall tasarım deneyi, TS EN 12697-34 ve ASTM D1559 standartlarına uygun yapılmıştır. Marshall tasarım deneyinin amacı; karışımlara göre yapılan briketlerin yanal yüzlerine baskı yapılarak numunenin deformasyona karşı maksimum dayanıklılığı ve numune üzerine maksimum yük uygulandığı anda numunedeki plastik şekil değiştirmenin (deformasyon) belirlenmesidir. Marshall tasarım deneyi ile; stabilite değeri, akma değeri, optimum bitüm oranı, boşluk oranları, agrega ve bitüm yüzdeleri bulunur. Dünya genelinde en çok kullanılan tasarım yöntemi, aşağıda sıralanan bazı avantajlarından dolayı Marshall yöntemidir.

- Marshall cihazının numunenin tamamına gerilme uygulaması.
- Deney yapılışının kolay ve hızlı olması.
- Deneyin yapılışında gerekli olan malzemelerin taşınabilmesi.
- Deney sonuçlarının gerçek değerlere yakın olması.

Marshall tasarım deneyinde sırasıyla; agrega gradasyonu ayarlanır, bitüm sınıfı ve fiziksel özellikleri bulunur, agrega ve bitümün özgül ağırlıkları belirlenir, kullanılacak agrega ve bitüm miktarları hesaplanır, briketler hazırlanır, yoğunluğu ve boşluk oranları bulunur, stabilite ve akma değerleri bulunur, en sonunda verilere göre optimum bitüm oranı seçilir.

Marshall deney numunesinde kullanılacak 1150 gramlık kaba agrega, ince agrega ve filler karışımı için farklı boyutlardaki agregalarda elek analizi yapılır, uygun oranlar hesaplanana kadar denemeler yapılarak uygun gradasyon hazırlanır ve şartname sınırlarına uygunluğu kontrol edilir. Bir 1 set için 3 tane $63,5 \pm 1,27$ mm yüksekliğe sahip briket hazırlanır. Agrega ağırlığınca %3,5; %4; %4,5; %5; %5,5; %6; %6,5 oranlarında bitüm kullanılır. Örneğin, 1150 gram agrega karışımı ile %4 bitüm yüzdesine sahip bir briketin hazırlanmasında $1150 \times 4 / 100 = 46$ gram bitüm kullanılır. Optimum bitüm oranının bulunması için 7 set ve 3'er numune olmak üzere 21 numune hazırlanır.

Tablo 4.3'te ki agrega gradasyonuna göre her briket için 1150 gram kaba agrega, ince agrega ve filler karışımı hazırlanarak 24 saat boyunca 160°C sıcaklıktaki etüvde ısıtılır.



(a) Marshall deney malzemeleri



(b) Gradasyona uygun 1150 g agrega

Şekil 4.47. Marshall deney malzemeleri ve gradasyona uygun 1150 g agrega

Yüzdeliğe göre tartılıp hazırlanan bitüm ve deney aletleri olan briket kalıpları, spatula, karıştırma şişi, karıştırma kabı vb. malzemeler 160°C sıcaklıkta ısıtılır.



(a) 160°C sıcaklıktaki etüv (b) Marshall deney malzemelerinin etüvde ısıtılması

Şekil 4.48. 160°C sıcaklıktaki etüv ve Marshall deney malzemelerinin ısıtılması

Agrega etüvden alınarak, etüvden çıkarılmış karıştırma kabına boşaltılır ve karıştırılır. Hemen ardından agregaya ortasına bir çukur açılarak etüvden çıkarılan bitüm o çukura boşaltılır. Karıştırma kabı elektrikli karıştırıcıya yerleştirilerek yaklaşık 1,5 dakika homojen olacak şekilde karıştırılır.



(a) Karıştırma için kullanılan mikser (b) Marshall deney kalıpları

Şekil 4.49. Karıştırma için kullanılan mikser ve Marshall deney kalıpları

Briket kalıbı yağlanır. Karışım, ısınıp kaybetmeden kalıba homojen bir şekilde dökülür ve şişlenir. Homojen dağılım sağlandıktan sonra kalıp tokmağa yerleştirilir. Bu işlemler çok hızlı yapılır. Tokmağa yerleştirilen kalıp üstüne 4,536 kg ağırlığında bir tokmak 45,7 cm yükseklikten düşüş yapılacak şekilde 75 vuruş uygulanarak, karışımın kalıp içerisinde sıkıştırılması sağlanır. 75 vuruş yapıldıktan sonra hızlıca kalıp çıkarılıp ters çevrilir ve o tarafını da 75 tane uygulanarak sıkıştırılır.



(a) Tokmak cihazı (b) Tokmak cihazına numune yerleştirilmesi

Şekil 4.50. Tokmak cihazı ve tokmak cihazının içine numune yerleştirilmesi

Sıkıştırma işlemi bittikten sonra kalıp tokmaktan çıkarılarak numaralandırılır ve oda sıcaklığında soğumaya bırakılır.



(a) Marshall kalıbı içindeki briket (b) Briketlerin soğumaya bırakılması

Şekil 4.51. Marshall kalıbı içindeki briket ve briketlerin soğumaya bırakılması

Briketler yeteri kadar soğuduktan sonra kriko ile kalıplardan çıkarılır ve o şekilde soğuması için 24 saat oda sıcaklığında bekletilir.



(a) Briketlerin kriko ile kalıptan çıkarılması (b) Kalıptan çıkarılmış briketler

Şekil 4.52. Briketlerin kriko ile kalıptan çıkarılması ve kalıptan çıkarılmış briketler

24 saat sonrasında briketin köşeleri törpülenerek düzeltilir ve eşit aralıklarla üç noktadan kumpas yardımı ile yüksekliği ölçülerek not edilir. Ölçülen üç yüksekliğin ortalaması alınarak ortalama yükseklik bulunur. Briketlerin yüksekliği $63,5 \pm 1,27$ mm olmalıdır. Briket yüksekliği briketin dayanımını etkilemektedir. 63,5 mm'ye karşılık gelen katsayı 1'dir, briket yüksekliği 63,5 mm'den fazlaysa katsayı düşer; 63,5 mm'den düşükse katsayı artar. 63,5 mm'den farklı olan yüksekliklerde ise briket stabilitesi ile numunenin yüksekliğine göre bulunan katsayı çarpılarak düzeltilmiş stabilite değeri bulunur.



Şekil 4.53. Briketlerin yüksekliklerinin kumpas ile ölçülmesi

Yükseklik ölçümünden sonra briketin tartımı yapılır. Önce havada tartılır ve not edilir. Sonra su emmesi için belli bir süre su havuzunda bekletilir. Su emme işleminden sonra sudaki ağırlığı belirlenir. Daha sonra su içerisinden çıkarılıp yüzeyinde bulunan su damlacıkları, havlu ile kurularak doygun yüzey kuru ağırlığı tartılır.



(a) Briket havadaki ağırlığının tartılması (b) Briket sudaki ağırlığının tartılması

Şekil 4.54. Briket havadaki ve sudaki ağırlıklarının tartılması

Tartımlar sonucu elde edilen değerler ile aşağıda verilen (4.18) formülü kullanılarak briketin hacmi hesaplanır: (4.18)

$$V = W_{\text{doygun}} - W_{\text{su}}$$

Formüldeki; V değeri briketin hacmini, W_{doygun} değeri briketin doygun yüzey kuru ağırlığını (g), W_{su} değeri ise briketin sudaki ağırlığını göstermektedir.

Briketlerin; boyutu, kuru ağırlıkları, doygun yüzey kuru ağırlıkları ve hacmi belirlendikten sonra bulunan bu değerler Marshall tablosuna yazılarak yoğunluk değerleri ve boşluk oranları hesaplanır. Sıkıştırılmış briketlerin pratik hacim özgül ağırlığı aşağıda verilen (4.19) formülü kullanılarak hesaplanır:

$$D_p = \frac{W_{\text{hava}}}{V} \quad (4.19)$$

Formüldeki; D_p değeri briketin sıkıştırılmış pratik hacim özgül ağırlığını, A değeri briketin havadaki kuru ağırlığını (g), V değeri ise briketin hacmini göstermektedir.

Agregaların efektif özgül ağırlığı sabit olmakla beraber bitüm emme potansiyeli içerisindeki bitüm yüzdesinden bağımsızdır. Agregaların efektif özgül ağırlık değeri ise aşağıda verilen (4.20) formülü kullanılarak hesaplanır:

$$G_{se} = \frac{(G_{sb} + G_{sa})}{2} \quad (4.20)$$

Formüldeki, G_{se} değeri agreganın efektif özgül ağırlığını, G_{sb} değeri agreganın hacim özgül ağırlığını, G_{sa} değeri ise agreganın zahiri özgül ağırlığını göstermektedir.

Hava boşlukları (V_h), sıkıştırılmış BSK içinde asfalt ile kaplanmış agreganın parçalarının arasında oluşan hava kabarcıklarıdır. Hava boşluğu bitümlü karışımın durabilitesini ve yoğunluğunu etkiler. BSK’da yoğunluğun artmasıyla hava boşluğu azalır. Agregaların arasında olan boşluk (V_{ma}), sıkıştırılmış agregaların tanecikleri arasında olan boşluk alanı hacmidir. Mineral agregalar arasındaki boşluk BSK’nın durabilite özelliğine etki eden önemli bir parametredir. V_{ma} , bitümün ve hava boşluğunun doldurduğu alanın tamamını kaplar ve karışım hacmi toplamının yüzdesi olarak tanımlanır. Bitüm ile dolu boşluk yüzdesi (V_{fa}), kalıbın içinden çıkarılmış briketin içindeki agregaların arasındaki dolu olan bitümü tanımlar. V_{fa} , agregaların arasında oluşan maksimum boşluğu ve asfalt içeriğini sınırlamaktır. V_h , V_{ma} ve V_{fa} dahil olmak üzere diğer hesaplama formülleri Marshall deney anlatımı sonunda yer alan Tablo 4.9’ da verilmiştir. Son olarak, numunenin stabilite ve akma değerleri bulunur. Marshall Stabilitesi deformasyona karşı gösterilen maksimum dayanımdır, akma değeri ise maksimum yüke ulaşıldığındaki kırılma sırasında oluşan çökme ve hareket miktarıdır. Briketler önceden 60°C sıcaklığa ayarlanmış su banyosunda 30 dakika boyunca bekletilir.



(a) 60°C sıcaklığa ayarlanmış su banyosu (b) Briketin su banyosunda bekletilmesi

Şekil 4.55. 60°C sıcaklıktaki su banyosu ve briketlerin su banyosunda bekletilmesi

Numunelerin su banyosundaki süresi dolunca, briketler su banyosundan alınarak havlu ile kurulanır ve Marshall test cihazındaki çelik halkanın sabit olan üst segmanı ile 50.8 mm/dk hıza sahip alt segmanı arasına yerleştirilerek yüke maruz bırakılır. Akmayı ölçen aparat cihaza takılarak sıfıra ayarlanır yük uygulanmaya başlanır. Bu işlemler yaklaşık 40 saniye içerisinde hızlıca yapılmalıdır. Maksimum yüke ulaşana kadar, dakikada 50.8 mm/dk' lik hız ile yükleme yapılır ve briketin dayanımı bittiği anda yükleme durur. Numunenin kırıldığı andaki maksimum yük değeri ile akma değeri ölçülür. Basınç değeri arttıkça stabilometrede okunan değer artarak en yüksek değere ulaşır sonra düşmeye başlayarak numune kırılır böylece cihazda gösterilen yükleme değerlerine göre çizilen grafiklerle stabilite ve akma değerleri belirlenir.



(a) Marshall test cihazı

(b) Brikete yük uygulanması

Şekil 4.56. Marshall test cihazı ve brikete yük uygulanması

Akma değeri ile numunenin düşey deformasyondaki değer birbirine eşittir. Stabilite sonuçları ise standart numune yüksekliği kabul edilen 63,5 mm'lik numuneler için doğrudan alınır, yüksekliği 63,5 mm'den az veya fazla olan numuneler için stabilite düzeltme katsayısı kullanılarak aşağıda verilen (4.21) formülü kullanılarak hesaplanır. Düzeltme katsayısı uygulanmış sonuçların şartnameye uygunluğu kontrol edilir.

$$c = 5,24 \times e^{(-0,0258 \times h)} \quad (4.21)$$

Formüldeki; c değeri düzeltme katsayısını, h değeri ise numune yüksekliğini göstermektedir.

Her set için bulunan üç adet stabilite değeri ve akma değerinin ortalaması alınıp stabilite değeri ve akma değeri belirlenir. Elde edilen stabilite ve akma ortalamaları ile yapılan üç numunenin değerleri karşılaştırılır. Aradaki fark stabilitede %15, akmada ise %20 ve üzerinde ise o numune değerlendirilmez. Kalan numunelerin ortalamaları hesaplanarak sapma miktarı belirlenir. Stabilitede %15, akmada %20 oranında sapma varsa deney iptal edilir ve yeni bir set yapılır.

Marshall stabilitesinin, akmaya bölümü ile Marshall katsayısı (MQ) belirlenir. Marshall katsayısı, karışımın sertliğini ve bitümlü karışımın deformasyona karşı direncini gösterir. Bitümün optimum oranını bulmak için; hacimsel parametreler, Marshall stabilitesi ve akmanın belirlenmesi gerekir. Gereken hesaplamaların sonucunda şartnameye uygun olacak şekilde %4 hava boşluğu oranını sağlayacak bitüm oranı, bitümün optimum oranını belirler. Bitüm oranı ve boşluk oranı grafiğinde %4 hava boşluğuna karşılık gelen bitüm oranı, V_{ma} , V_{fa} , stabilite ve akma değerlerinin şartnamelere uygunluğu kontrol edilir. Değerlerin şartnamenin sınırları içerisinde olması durumunda optimum bitüm oranı bulunur. Tablo 4.8’de Binder gradasyonu için Karayolları Teknik Şartnamesinde yer alan Marshall tasarım deneyi kriterleri verilmiştir.

Tablo 4.8. Marshall tasarım deney kriterleri

Tasarım Kriteri	Deney Standardı	Binder
Sıkıştırma, her bir yüzey için darbe sayısı	TS EN 12697-30	75
Stabilite (kg)	TS EN 12697-34	min 750
Akma (mm)	TS EN 12697-34	2-4
Boşluk (%)	TS EN 12697-8	4-6
VFA (%)	TS EN 12697-8	60-75
VMA (%)	TS EN 12697-8	13-15

Agrega ağırlığınca %3,5; %4; %4,5; %5; %5,5; %6; %6,5 oranlarında bitüm ile 7 set 3’er numune olmak üzere 21 adet numune hazırlanarak optimum bitüm oranı hesaplanır.



Şekil 4.57. 21 adet Marshall deney numunesi

Optimum bitüm oranı belirlendikten sonra bu oranla 3 adet numune hazırlanarak sonuçlar kontrol edilir. Optimum bitüm oranı bulunurken Tablo 4.9'daki formüller kullanılır.

Bulunan optimum bitüm oranına göre yapılan 3 adet numunenin sonuçları sağlandıktan sonra Tablo 4.6'da verilen deney planındaki 16 farklı karışım için 16 set 3'er numune olmak üzer 48 adet Marshall numunesi hazırlanmıştır.



Şekil 4.58. 16 farklı karışımla hazırlanan 48 adet Marshall deney numunesi

Marshall tasarım deneyi sonrası, Taguchi metodu ile stabiliteyi maksimum yapan optimum seviyeler belirlenmiş ve doğrulama amacıyla 3 adet kontrol numunesi hazırlanarak Marshall stabilite deneyi yapılmıştır.



Şekil 4.59. Taguchi yöntemi ile belirlenen optimum Marshall numuneleri

Sonuç olarak, optimum bitüm oranını bulmak için 7 set ve bunların değerlendirilmesinden sonra optimum bitüm oranı için 1 set ayrıca 16 karışım için 16 set ve bu karışımların optimumu için 1 set olmak üzere ve her set için 3'er numune olmak üzere toplamda 25 set yani 75 Marshall numunesi dökülmüştür.



Şekil 4.60. Toplamda yapılan 75 adet Marshall numunesi

Tablo 4.9. Optimum bitüm %'si için kullanılan formüller tablosu

Kısaltma	Açıklama	Formül
W_a	Agregaya oranına göre bitüm %'si	$W_a = (W_B / W_A) \times 100$
W_b	Karşım oranında göre bitüm %'si	$W_b = [(W_B / W_A + W_B)] \times 100$
W_A	Agreganın toplam ağırlığı	1150 g
W_B	Bitüm ağırlığı (seçilen %'ye göre)	
W_{hava}	Havadaki kuru ağırlık (g)	Tartımla elde edilen ağırlık değeri
W_{su}	Sudaki ağırlık (g)	Tartımla elde edilen ağırlık değeri
W_{doygun}	Doygun yüzey kuru ağırlık (g)	Tartımla elde edilen ağırlık değeri
V	Numune hacmi	$V = W_{doygun} - W_{su}$
D_p	Numune pratik hacim özgül ağırlığı	$D_p = W_{hava} / V$
D_{port}	Numune ortalama pratik hacim özgül ağ.	$D_{port} = (D_{p1} + D_{p2} + D_{p3}) / 3$
D_t	Numune teorik maksimum özgül ağırlığı	$D_t = 100 / [(100 - W_b / G_{se}) + (W_b / G_b)]$
V_h	Numunedeki boşluk %'si	$V_h = [(D_t - D_{port}) / D_t] \times 100$
V_b	Numunedeki efektif bitüm hacmi %'si	$V_b = (P_{be} \times D_{port}) / G_b$
V_a	Numunedeki agreg a hacmi %'si	$V_a = 100 - (V_h + V_b)$
V_{ma}	Agregalar arası boşluk %'si	$V_{ma} = 100 - V_a = (V_h + V_b)$
V_{fa}	W_{ma} 'nın bitümle dolu boşluk %'si	$V_{fa} = (V_b / V_{ma}) \times 100$
P_{be}	Agrega ağırlığına göre efektif bitüm %'si	
G_{sb}	Agrega hacim özgül ağırlığı	$G_{sb} = 100 / [(\%K / G_k - h) + (\%I / G_i - h) + (\%F / G_f - z)]$
G_{sa}	Agrega zahiri özgül ağırlığı	$G_{sa} = 100 / [(\%K / G_k - z) + (\%I / G_i - z) + (\%F / G_f - z)]$
G_{se}	Agrega efektif özgül ağırlığı	$G_{se} = (G_{sb} + G_{sa}) / 2$
%K	Karışımındaki % kaba agreg a	
%İ	Karışımındaki % ince agreg a	
%F	Karışımındaki % filler	

4.2.3.8. Fourier dönüşümü kızılötesi spektroskopisi (FT-IR) deneyi

Fourier dönüşümü kızılötesi spektroskopisi (FT-IR) deneyi, ASTM D7405 standardına uygun yapılmıştır. FT-IR deneyinin amacı; numunenin kimyasal bileşenlerini, moleküler yapılarını, fonksiyonel gruplarını (örneğin; hidroksil, karboksil, asit anhidrit grupları gibi karakteristik emilim bantlarını göstererek numunenin kimyasal bileşimini belirler ve farklı bileşenlerin varlığını tespit eder), farklı bileşenlerin oranlarını ve oksidasyon durumunu (oksidasyon, numunenin çeşitli koşullarda maruz kaldığı kimyasal değişikliklerin bir sonucudur) kısaca kimyasal ve morfolojik özelliklerini belirler. Kısa sürede analiz edilmesi, analiz sonucunun detaylı bilgiler vermesi, yüksek kalitede ölçüm yapılması için araştırılan malzemenin yalnızca küçük bir hacminin gerekli olması, maliyetsiz olması avantajlarından dolayı bağlayıcının karakterizasyonunda en sık kullanılan yöntemdir.

Fourier Transform (FT) yani Fourier dönüşümü spektroskopisi ile maddenin ışıkla etkileşimi analiz edilir ve matematiksel işlem kullanılarak maddenin spektrumu elde edilir. FT, zaman alanındaki bir sinyalin frekans alanına dönüştürerek sinyalin frekans bileşenlerini görselleştirir. FT spektroskopisi genellikle infrared (IR) yani kızılötesi spektroskopisi ve nükleer manyetik rezonans (NMR) teknikleri ile kullanılır.



Şekil 4.61. FT-IR deney cihazı

Bu çalışmada FT, IR tekniği ile kullanılmıştır. IR spektroskopi maddenin kimyasal bağlarının ve moleküler yapılarının analiz edildiği bir tekniktir. Bu teknik ile maddenin IR bölgesindeki emilim veya saçılma özellikleri ölçülerek maddenin kimyasal analizi yapılır.

Bitüm numunesi uygun bir numune tutucuya yerleştirilir ve homojen bir şekilde düzgün bir tabaka halinde FT-IR spektrometresine yerleştirilir. FT-IR spektrometresi başlatılır ve sistem ölçüm için hazırlanır. Arka plan spektrumu alınır ve ayarlamalar yapılır. Doğru sonuçlar elde edilmesi için arka plan dikkate alınarak boş bir numune tutucusu veya temiz bir malzeme üzerinde bir referans ölçümü yapılır. Analiz edilen örneğin spektrumu alınır. Örneğe IR (infrared) ışını gönderilir ve örnek tarafından emilen veya saçılan ışığı algılar böylece molekül içi bağlar üstüne düşen kızılötesi ışınların, bağların titreşimi ve dönme hareketi ile soğurulması sağlanır. Elde edilen spektrum, veri işleme yazılımı kullanılarak analiz edilir. Spektrumun belli bantları, karakteristik pikleri ve özellikleri incelenir. IR Analizi ile; kimyasal bağlar, molekül yapısı, molekül içi bağlar, molekül içi fonksiyonel gruplar, numune içindeki bileşen miktarı gibi bazı bilgiler elde edilir.

4.2.3.9. Taguchi metodu

Taguchi metodu için belirli bir standart yoktur fakat kullanımı ve uygulanması ile ilgili literatür vardır. Taguchi metodunun amacı; parametre ve seviye sayılarının çok olduğu çalışmalarda optimum parametre ve seviyeleri bulup, deney sayısını azaltarak zamandan ve maliyetten tasarruf edilmesidir. Ürün kalitesinin artmasını sağlamakta ve performansa ilişkin tasarımların optimize edilmesinde çok faydalı bir sistemdir (Aman vd., 2023).

Parametre sayısı çoğaldıkça yapılması gereken deneyler de artar fakat bu çoğu zaman mümkün olmuyor. Bu yüzden, Dr. Genichi Taguchi tarafından bulunan Taguchi metodu mühendislik alanındaki problemlerin çözümünde kullanılır (Bayrak, 2007; Mercan, 2019; Mola vd., 2021; Baş vd., 2022; Koh vd., 2023; Rajkumar vd., 2023). Aslında Taguchi metodunun temel amacı, ortogonal dizinleri kullanarak deney sayısını büyük oranda azaltmak ve kontrol edilemeyen tüm faktörlerin etkisini minimize etmeye çalışmaktır.

Taguchi metodu, optimizasyon kriteri olarak performans istatistiklerini (S/N) kullanır. En büyük – en iyi, nominal (orta) – en iyi ve en küçük – en iyi olmak üzere üç farklı performans istatistiği vardır. Yapılan deneyler sonucunda elde edilen verilerin kullanılması ile S/N değeri, en büyük – en iyi ve en küçük – en iyi istatistikleri aşağıda verilen (4.22) ve (4.23) formülleri kullanılarak hesaplanır:

$$\text{En büyük – en iyi} \quad S/N_L = -10\text{Log} \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{Y_i^2} \right] \quad (4.22)$$

$$\text{En küçük – en iyi} \quad S/N_L = -10\text{Log} \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i^2 \right] \quad (4.23)$$

Formüllerdeki; S/N_L değeri performans istatistiğini, n değeri deney kombinasyonundaki tekrar sayısını, Y_i değeri ise i. deneyin performans istatistiğini göstermektedir.

Bu tez çalışmasındaki deney planı Taguchi metodu ile oluşturulmuştur. Tahminlerin %95 güven seviyesinde yapılabilmesi için performans istatistikleri (S/N) kullanılmıştır.

Taguchi metodunda kullanılan parametre ve seviyeler Tablo 4.10'da verilmiştir.

Tablo 4.10. Deney parametreleri ve seviyeleri

Parametre	Seviye			
	1	2	3	4
(A) GNP (%)	0,00 (A1)	0,35 (A2)	0,70 (A3)	1,00 (A4)
(B) Sıcaklık (°C)	145 (B1)	160 (B2)	175 (B3)	190 (B4)
(C) Süre (dakika)	15 (C1)	30 (C2)	45 (C3)	60 (C4)
(D) Hız (rpm)	1000 (D1)	2000 (D2)	3000 (D3)	4000 (D4)

Deney planı oluşumunda kullanılan L16 ortogonal dizisi Tablo 4.11’ de verilmiştir.

Tablo 4.11. Taguchi metodu ile oluşturulan deney planı

Deney No	GNP (%)	Sıcaklık (°C)	Süre (dakika)	Hız (rpm)
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	1	4	4	4
5	2	1	2	3
6	2	2	1	4
7	2	3	4	1
8	2	4	3	2
9	3	1	3	4
10	3	2	4	3
11	3	3	1	2
12	3	4	2	1
13	4	1	4	2
14	4	2	3	1
15	4	3	2	4
16	4	4	1	3

5. ARAŞTIRMA BULGULARI

5.1. Saf Bitüm Deney Sonuçları

Saf bitüme yapılan laboratuvar deney sonuçları Tablo 5.1’de verilmiştir.

Tablo 5.1. Saf bitüm deney sonuçları

Deneyler	Sonuçlar
RTFOT öncesi penetrasyon	82,5 (0,1 mm)
RTFOT sonrası penetrasyon	50,17 (0,1 mm)
RTFOT öncesi yumuşama noktası	45°C
RTFOT sonrası yumuşama noktası	52° C
RTFOT öncesi penetrasyon indeksi	-1,35
RTFOT sonrası penetrasyon indeksi	-0,70
Parlama noktası	340°C
Elastik geri dönme yüzdesi	9 (%)
RTFOT kütle kaybı	- 0,5786 (%)
Marshall stabilitesi	1.098,6 kg

5.2. RTFOT Öncesi Penetrasyon Deney Sonuçları

RTFOT deneyi öncesinde karışımlara yapılmış penetrasyon deneyleri ile bulunan penetrasyon değerleri ve L16 ortogonal dizisine uygun olarak Taguchi Yöntemi ile hesaplanmış S/N değerleri Tablo 5.2'de verilmiştir. Penetrasyon değerlerini maksimum yapan en büyük - en iyi performans istatistiği kullanılmıştır.

Tablo 5.2. RTFOT öncesi penetrasyon değerleri ve S/N değerleri

Deney No	1. Numune (0,1mm)	2. Numune (0,1mm)	3. Numune (0,1mm)	Ortalama (0,1mm)	S/N
1	89,90	91,00	89,70	90,20	39,10
2	86,50	87,90	87,20	87,20	38,81
3	75,90	76,50	74,40	75,60	37,57
4	51,50	52,50	53,80	52,60	34,42
5	93,70	94,10	91,80	93,20	39,39
6	82,50	82,80	81,60	82,30	38,31
7	78,50	78,60	75,40	77,50	37,79
8	72,50	73,40	74,00	73,30	37,30
9	85,10	87,80	88,40	87,10	38,80
10	89,20	91,00	89,80	90,00	39,08
11	97,30	100,20	100,70	99,40	39,95
12	94,50	95,20	91,10	93,60	39,43
13	79,10	80,60	79,10	79,60	38,02
14	86,90	88,90	87,00	87,60	38,85
15	69,80	71,30	70,70	70,60	36,98
16	75,80	76,50	76,60	76,30	37,65

Hesaplanan S/N değerleri sonrası, seviyelerin optimumunu bulmak için hesaplanmış ortalama S/N etkileri Tablo 5.2'de verilmiştir.

Tablo 5.3. RTFOT öncesi penetrasyon ortalama S/N etkileri

Ortalama S/N Etkileri				
	GNP	Sıcaklık	Süre	Hız
1. Seviye	37,476	38,828	38,753	38,791
2. Seviye	38,196	38,763	38,650	38,520
3. Seviye	39,315	38,070	38,131	38,424
4. Seviye	37,874	37,199	37,327	37,126

RTFOT öncesi penetrasyonun optimum seviyeleri Tablo 5.4'te belirtildiği gibi A3, B1, C1 ve D1 olacak şekilde belirlenmiştir. Penetrasyon değerine en yüksek oranda etki eden parametreler sırasıyla GNP oranı, sıcaklık, hız ve süre olmuştur. Penetrasyon değeri için Tablo 4.6'daki deney planı ele alındığında optimum değeri veren deneyin bulunmadığı görülmüştür. Bu yüzden belirlenen optimum penetrasyon değerini doğrulamak için parametrelerin A3, B1, C1 ve D1 seviye değerlerine uygun numune hazırlanmış ve doğrulama deneyi yapılmıştır. Doğrulama deneyi sonucunda penetrasyon değeri 105,9 (0,1 mm) bulunmuştur. Bu değere denk gelen S/N değeri 40,498'dir. Bu değer %95 güven seviyesinde 40,454 ile 41,628 değerleri arasında olması gerekmektedir. 40,498 değeri 40,454 ile 41,628 değerler arasında olduğu için sonucun %95 güven aralığında doğru olduğu belirtilebilir.

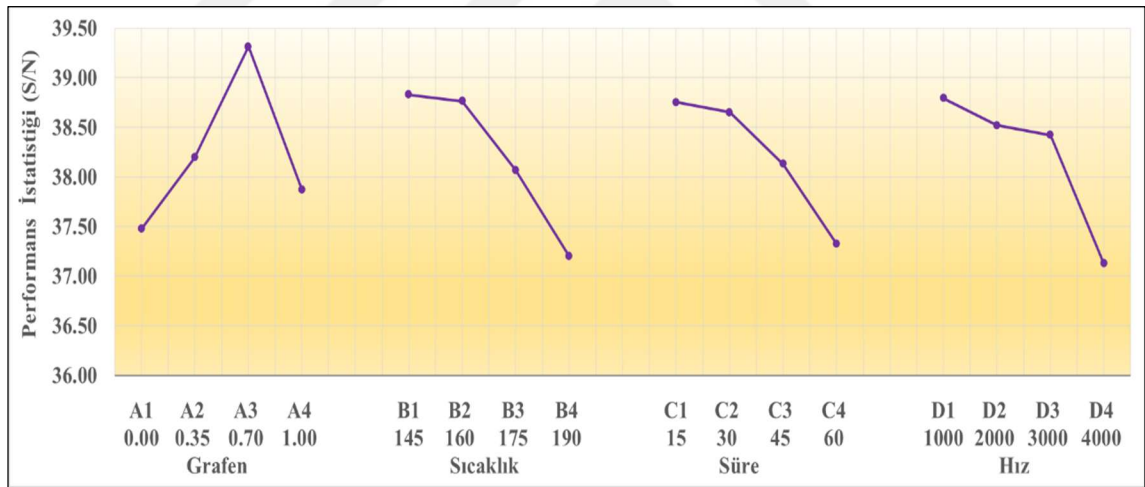
Tablo 5.4. RTFOT öncesi penetrasyon performans tahminleri

Faktörler	Seviye	S/N' e olan katkıları
GNP	A3	1,099
Sıcaklık	B1	0,613
Süre	C1	0,537
Hız	D1	0,576
Tüm Faktörlerin Katkısı (S/N)		2,826
Ortalama Performans İstatistiği (S/N)		38,215
Optimum Şartlarda Beklenen Değer (S/N) / (0,1 mm)		41,041 / 112,732
Doğrulama Deney Sonucu (S/N) / (0,1 mm)		40,498 / 105,900
Güven Aralığı ($\alpha=95\%$) (S/N)		40,454 / 41,628

Şekil 5.1'de görüldüğü gibi bitümün penetrasyon değeri; GNP katkı maddesinin %0,70 oranına kadar artmış, %1,0 oranında ise bir miktar azalmıştır. Sıcaklık, süre ve hız arttıkça penetrasyon değeri azalmıştır. Taguchi yöntemi ile oluşturulan deney planı dikkate alınarak yapılmış olan deneylerin sonucuna göre en yüksek penetrasyon değeri saf bitüme göre %20,485 artışla 99,40 (0,1 mm) olmuştur. Penetrasyon değerini maksimum yapan en büyük - en iyi performans istatistiği kullanılarak penetrasyon değerini en büyük yapan optimum seviyelere uygun hesaplanan penetrasyon değeri ise saf bitüme göre %36,642 artışla 112,732 (0,1mm) olmuştur.

Ghalandari Shamami vd. (2023) çalışmalarında 150°C karıştırma sıcaklığı, 4500 rpm karıştırma hızı, 45 dakika karıştırma süresi parametreleri ile %0,30 oranında GNP katkı maddesinin, saf bitümün penetrasyonunu %10,873 azalttığı sonucuna ulaşmışlardır. Parametreleri yukardaki çalışma ile en çok benzeyen A2, B1, C3, D4 yani 0,35 GNP oranı, 145°C karıştırma sıcaklığı, 45 dakika karıştırma süresi ve 4000 rpm karıştırma hızına sahip olan taguchi tahminine göre penetrasyon değeri 76,166 (0,1 mm) tahmin edilmiştir ve 70/100 saf bitümün penetrasyonunu % 7,673 azalttığı tahmin edilmiştir.

Hafeez vd. (2019) çalışmalarında 158°C karıştırma sıcaklığı, 30 dakika karıştırma süresi parametreleri ile %2 oranında GNP katkı maddesinin, 60/70 saf bitümün penetrasyonunu %34.43 azalttığını ortaya koymuşlardır. Parametrelerin yukardaki çalışma ile en çok benzeyen A4, B2, C2, D4 Taguchi tahmininde (%1 GNP, 160°C karıştırma sıcaklığı, 30 dakika karıştırma süresi, 4000 rpm karıştırma hızı) penetrasyon değeri 77,337 (0,1 mm) olarak bulunmuştur ve saf bitüme göre %6,258 azalma olduğu görülmüştür.



Şekil 5.1. RTFOT öncesi penetrasyonun tüm seviyeler için performans istatistikleri

Yapılan penetrasyon testlerinin istatistiksel olarak anlamlı olup olmadığının belirlenmesi için varyans analizi (ANOVA) yapılmıştır. Deney planında bulunan her bir parametrenin F değeri, optimizasyon üzerindeki etkisini göstermektedir ve basitçe sapmaların karesinin ortalama karesel hataya oranıdır (Roy, 2010). Daha büyük F değeri penetrasyon üzerinde daha büyük etkiyi gösterir. Deney planında belirlenen parametre ve seviyelerin optimum kombinasyonu, ANOVA istatistiksel testi ve performans istatistikleri kullanılarak tahmin edilebilir. Penetrasyonu artırmaya yönelik ANOVA sonuçları Tablo 5.5'te verilmektedir. (3,3) için F tablo değeri %95 güven seviyesinde 9.277'dir. Tüm faktörler için F değeri, %95 güven aralığı için tablodan çıkarılan F değerinden daha büyüktür. Aynı zamanda tüm faktörler için P-değeri 0.05'ten küçüktür yani model anlamlıdır. Bu durum tüm faktörlerin varyansının hatanın varyansına göre anlamlı yani istatistiksel olarak geçerli olduğunu göstermektedir. Ayrıca penetrasyon değeri üzerinde en fazla katkıyı %28,545 ile GNP'nin yaptığı görülmüştür. Bunu sırasıyla sıcaklık, hız ve süre izlemiştir.

Tablo 5.5. RTFOT öncesi penetrasyon ANOVA tablosu

Faktörler	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Varyans	F-Değeri	Net Toplam	Katkı	P-Değeri
GNP	3	7,487	2,496	64,049	7,371	28,545%	0,003
Sıcaklık	3	6,914	2,305	59,142	6,797	26,359%	0,004
Süre	3	5,094	1,698	43,576	4,977	19,421%	0,006
Hız	3	6,618	2,206	56,607	6,501	25,229%	0,004
Hata	3	0,117	0,039			0,446%	
Toplam	15	26,230				100,000	

5.3. RTFOT Sonrası Penetrasyon Deney Sonuçları

RTFOT deneyi sonrasında karışımlara yapılmış penetrasyon deneyleri ile bulunan RTFOT sonrası penetrasyon değerleri ve L16 ortogonal dizisine uygun olarak Taguchi Yöntemi ile hesaplanmış S/N değerleri Tablo 5.6'da verilmiştir. Penetrasyon değerlerini maksimum yapan en büyük - en iyi performans istatistiği kullanılmıştır.

Tablo 5.6. RTFOT sonrası penetrasyon değerleri ve S/N değerleri

Deney No	1. Numune (0,1mm)	2. Numune (0,1mm)	3. Numune (0,1mm)	Ortalama (0.1mm)	S/N
1	58,30	55,70	55,60	56,53	35,05
2	52,10	52,00	53,00	52,37	34,38
3	46,30	49,30	47,10	47,57	33,55
4	39,70	39,50	41,20	40,13	32,07
5	55,40	57,70	57,80	56,97	35,11
6	47,80	48,60	48,90	48,43	33,70
7	45,90	46,60	48,70	47,07	33,45
8	46,00	45,60	47,70	46,43	33,34
9	52,80	54,90	57,90	55,20	34,84
10	51,40	53,90	54,10	53,13	34,51
11	52,80	53,00	54,10	53,30	34,53
12	55,10	56,70	58,00	56,60	35,06
13	51,70	53,60	55,50	53,60	34,58
14	53,80	55,60	52,80	54,07	34,66
15	47,80	47,50	47,20	47,50	33,53
16	47,50	49,60	50,00	49,03	33,81

Hesaplanan S/N değerleri sonrası seviyelerin optimumunu bulmak için hesaplanmış ortalama S/N etkileri Tablo 5.7'de verilmiştir.

Tablo 5.7. RTFOT sonrası penetrasyon ortalama S/N etkileri

Ortalama S/N Etkileri				
	GNP	Sıcaklık	Süre	Hız
1. Seviye	33,761	34,895	34,273	34,554
2. Seviye	33,902	34,312	34,521	34,209
3. Seviye	34,734	33,767	34,095	34,244
4. Seviye	34,146	33,568	33,654	33,536

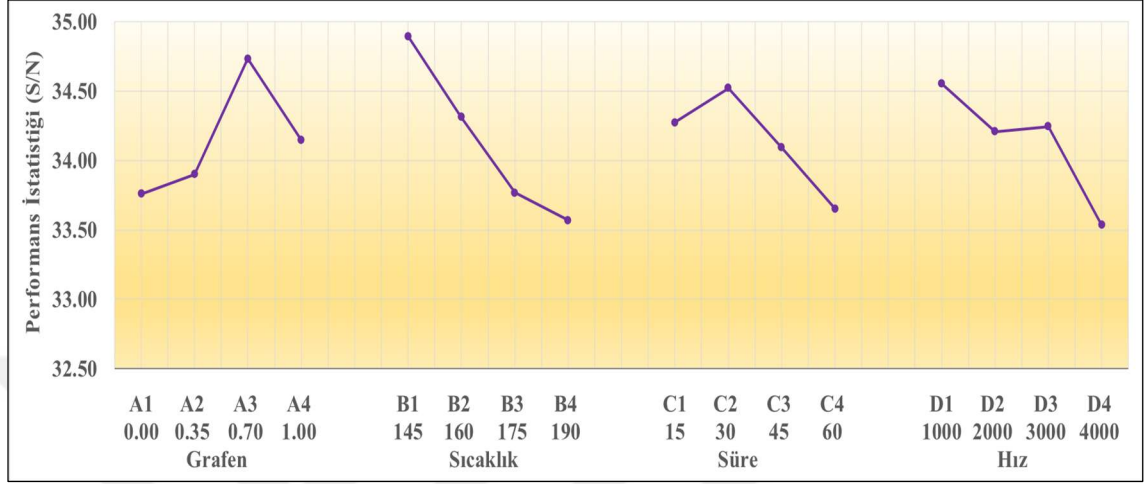
RTFOT sonrası penetrasyonun optimum seviyeleri Tablo 5.8’de belirtildiği gibi A3, B1, C2 ve D1 olacak şekilde belirlenmiştir. Penetrasyon değerine en yüksek oranda etki eden parametreler sırasıyla sıcaklık, GNP oranı, hız ve süre olmuştur. Penetrasyon değeri için Tablo 4.6’daki deney planı ele alındığında optimum değeri veren deneyin bulunmadığı görülmüştür. Bu yüzden belirlenen optimum penetrasyon değerini doğrulamak için parametrelerin A3, B1, C2 ve D1 seviye değerlerine uygun numune hazırlanmış ve doğrulama deneyi yapılmıştır. Doğrulama deneyi sonucunda penetrasyon değeri 67,6 (0,1 mm) bulunmuştur. Bu değere denk gelen S/N değeri 36,599’dur. Bu değer %95 güven seviyesinde 35,948 ile 36,646 değerleri arasında olması gerekmektedir. 36,599 değeri 35,948 ile 36,646 değerler arasında olduğu için sonucun %95 güven aralığında doğru olduğu belirtilebilir.

Tablo 5.8. RTFOT sonrası penetrasyon performans tahminleri

Faktörler	Seviye	S/N’ e olan katkıları
GNP	A3	0,598
Sıcaklık	B1	0,759
Süre	C2	0,385
Hız	D1	0,418
Tüm Faktörlerin Katkısı (S/N)		2,161
Ortalama Performans İstatistiği (S/N)		34,136
Optimum Şartlarda Beklenen Değer (S/N) / (0,1 mm)		36,297 / 65,290
Doğrulama Deney Sonucu (S/N) / (0,1 mm)		36,599 / 67,600
Güven Aralığı ($\alpha=95\%$) (S/N)		35,948 / 36,646

Şekil 5.2’de görüldüğü gibi bitümün penetrasyon değeri; GNP katkı maddesinin %0.70 oranına kadar artmış, %1,0 oranında ise bir miktar azalmıştır. Sıcaklık, süre ve hız arttıkça penetrasyon değeri azalmıştır dolayısıyla bitüm sertleşmiştir. Taguchi yöntemi ile oluşturulan deney planı dikkate alınarak yapılmış olan deneylerin sonucuna göre en yüksek penetrasyon değeri saf bitüme göre %13,554 artışla 56,97 (0,1 mm) olmuştur.

Penetrasyon değerini maksimum yapan en büyük - en iyi performans istatistiği kullanılarak penetrasyon değerini en büyük yapan optimum seviyelere uygun hesaplanan penetrasyon değeri ise saf bitüme göre %30,138 artışla 65,290 (0,1mm) olmuştur.



Şekil 5.2. RTFOT sonrası penetrasyonun tüm seviyeler için performans istatistikleri

Penetrasyonu artırmaya yönelik ANOVA sonuçları Tablo 5.9'da verilmektedir. (3,3) için F tablo değeri %95 güven seviyesinde 9,277'dir. Tüm faktörler için F değeri, %95 güven aralığı için tablodan çıkarılan F değerinden daha büyüktür. Aynı zamanda tüm faktörler için P-değeri 0,05'ten küçüktür yani model anlamlıdır. Penetrasyon değerine en fazla katkıyı sağlayan parametre %41,277 ile sıcaklık olmuştur. Bunu sırasıyla GNP oranı, hız ve süre izlemiştir.

Tablo 5.9. RTFOT sonrası penetrasyon ANOVA tablosu

Faktörler	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Varyans	F-Değeri	Net Toplam	Katkı	P-Değeri
GNP	3	2,215	0,738	53,666	2,174	21,444%	0,004
Sıcaklık	3	4,263	1,421	103,301	4,222	41,277%	0,002
Süre	3	1,605	0,535	38,891	1,564	15,540%	0,007
Hız	3	2,204	0,735	53,406	2,163	21,340%	0,004
Hata	3	0,041	0,014			0,400%	
Toplam	15	10,329				100,000	

5.4. RTFOT Öncesi Yumuşama Noktası Deney Sonuçları

RTFOT deneyi öncesinde karışımlara yapılmış yumuşama noktası deneyleri ile bulunan yumuşama noktası değerleri ve L16 ortogonal dizisine uygun olarak Taguchi Yöntemi ile hesaplanmış S/N değerleri Tablo 5.10'da verilmiştir. Yumuşama noktası değerlerini minimum yapan en küçük - en iyi performans istatistiği kullanılmıştır.

Tablo 5.10. RTFOT öncesi yumuşama noktası değerleri ve S/N değerleri

Deney No	1. Numune (°C)	2. Numune (°C)	Ortalama (°C)	S/N
1	46,00	46,00	46,00	-33,26
2	47,40	47,60	47,50	-33,53
3	50,90	51,10	51,00	-34,15
4	58,30	58,60	58,45	-35,34
5	45,00	46,00	45,50	-33,16
6	48,70	49,00	48,85	-33,78
7	47,50	48,00	47,75	-33,58
8	49,30	49,60	49,45	-33,88
9	48,00	48,00	48,00	-33,62
10	46,00	46,00	46,00	-33,26
11	46,30	47,30	46,80	-33,40
12	47,10	49,10	48,10	-33,64
13	46,00	45,00	45,50	-33,16
14	43,80	44,20	44,00	-32,87
15	50,50	50,80	50,65	-34,09
16	49,10	49,40	49,25	-33,85

Hesaplanan S/N değerleri sonrası seviyelerin optimumunu bulmak için hesaplanmış ortalama S/N etkileri Tablo 5.11'de verilmiştir.

Tablo 5.11. RTFOT öncesi yumuşama noktası ortalama S/N etkileri

Ortalama S/N Etkileri				
	GNP	Sıcaklık	Süre	Hız
1. Seviye	-34,069	-33,300	-33,571	-33,337
2. Seviye	-33,600	-33,359	-33,607	-33,496
3. Seviye	-33,482	-33,807	-33,632	-33,604
4. Seviye	-33,492	-34,178	-33,833	-34,207

RTFOT öncesi yumuşama noktasının optimum seviyeleri Tablo 5.12’de belirtildiği gibi A3, B1, C1 ve D1 olacak şekilde belirlenmiştir. Yumuşama noktası değerine en yüksek oranda etki eden parametreler sırasıyla sıcaklık, hız, GNP oranı ve süre olmuştur. Yumuşama noktası değeri için Tablo 4.6’daki deney planı ele alındığında optimum değeri veren deneyin bulunmadığı görülmüştür. Bu yüzden belirlenen optimum penetrasyon değerini doğrulamak için parametrelerin A3, B1, C1 ve D1 seviye değerlerine uygun numune hazırlanmış ve doğrulama deneyi yapılmıştır. Doğrulama deneyi sonucunda yumuşama noktası değeri 42,3 °C bulunmuştur. Bu değere denk gelen S/N değeri -32,527’dir. Bu değer %95 güven seviyesinde -32,903 ile -32,512 değerleri arasında olması gerekmektedir. 32,527 değeri -32,903 ile -32,512 değerler arasında olduğu için sonucun %95 güven aralığında doğru olduğu belirtilebilir.

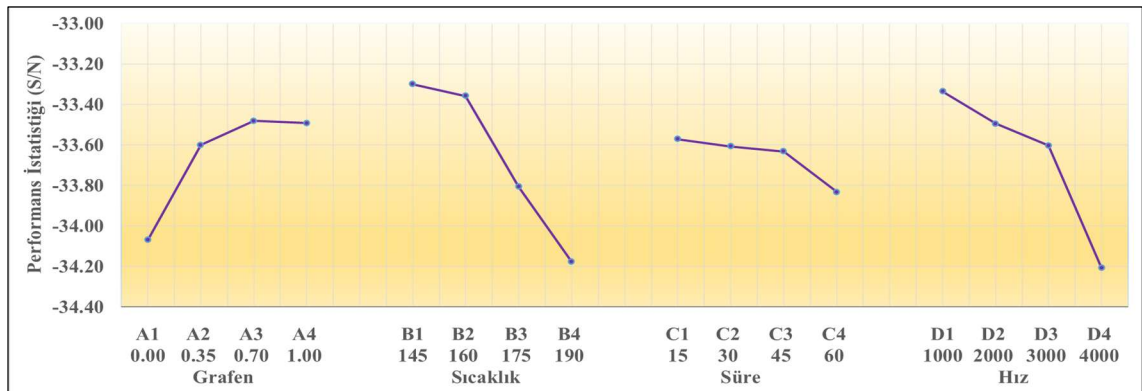
Tablo 5.12. RTFOT öncesi yumuşama noktası performans tahminleri

Faktörler	Seviye	S/N’ e olan katkıları
GNP	A3	0,179
Sıcaklık	B1	0,361
Süre	C1	0,089
Hız	D1	0,324
Tüm Faktörlerin Katkısı (S/N)		0,953
Ortalama Performans İstatistiği (S/N)		-33,661
Optimum Şartlarda Beklenen Değer (S/N) / (°C)		-32,708 / 43,190
Doğrulama Deney Sonucu (S/N) / (°C)		-32,527 / 42,300
Güven Aralığı ($\alpha=95\%$) (S/N)		-32,903 / -32,512

Şekil 5.3'te görüldüğü gibi bitümün yumuşama noktası değeri; GNP katkı maddesinin %0,70 oranına kadar azalmış, %1,0 oranında ise bu azalış durmuştur. Sıcaklık, süre ve hız arttıkça yumuşama noktası değeri artmıştır. Taguchi yöntemi ile oluşturulan deney planı dikkate alınarak yapılmış olan deneylerin sonucuna göre en düşük yumuşama noktası değeri saf bitüme göre %2,222 azalışla 44,00 °C olmuştur. Yumuşama noktası değerini minimum yapan en küçük - en iyi performans istatistiği kullanılarak yumuşama noktası değerini en küçük yapan optimum seviyelere uygun hesaplanan yumuşama noktası değeri ise saf bitüme göre %4,022 azalışla 43,19 °C olmuştur.

Ghalandari Shamami vd. (2023) çalışmalarında 150°C karıştırma sıcaklığı, 4500 rpm karıştırma hızı, 45 dakika karıştırma süresi parametreleri ile %0,30 oranında GNP katkı maddesinin, saf bitümün yumuşama noktasını %4,875 artırdığı sonucuna ulaşmışlardır. Parametrelerin yukardaki çalışma ile en çok benzeyen A2, B1, C3, D4 yani 0,35 GNP oranı, 145°C karıştırma sıcaklığı, 45 dakika karıştırma süresi ve 4000 rpm karıştırma hızına sahip olan Taguchi tahminine göre yumuşama noktası değeri 48,737°C tahmin edilmiştir ve 70/100 saf bitümün yumuşama noktasını %8,311 artırdığı görülmüştür.

Hafeez vd. (2019) çalışmalarında 158°C karıştırma sıcaklığı, 30 dakika karıştırma süresi parametreleri ile %2 oranında GNP katkı maddesinin, 60/70 saf bitümün yumuşama noktasını %3,13 artırdığını ortaya koymuşlardır. Parametrelerin yukardaki çalışma ile en çok benzeyen A4, B2, C2, D4 Taguchi tahmininde (%1 GNP, 160°C karıştırma sıcaklığı, 30 dakika karıştırma süresi, 4000 rpm karıştırma hızı) yumuşama noktası değeri 48,323°C olarak hesaplanmıştır ve 70/100 saf bitümün yumuşama noktasında %7,384 artış olduğu görülmüştür.



Şekil 5.3. RTFOT öncesi yumuşama noktası tüm seviyeler için performans istatistikleri

En küçük en iyi performans istatistiği kullanılarak yumuşama noktası değerini minimize eden ANOVA sonuçları Tablo 5.13'te verilmektedir. (3,3) için F tablo değeri %95 güven seviyesinde 9.277'dir. Tüm faktörler için F değeri, %95 güven aralığı için tablodan çıkarılan F değerinden daha büyüktür. Aynı zamanda tüm faktörler için P-değeri 0.05'ten küçüktür yani model anlamlıdır. Yumuşama noktası değerine %41,799 ile en fazla katkıyı sağlayan parametre sıcaklık olmuştur. Bunu sırasıyla hız, GNP oranı ve süre izlemiştir.

Tablo 5.13. RTFOT öncesi yumuşama noktası ANOVA tablosu

Faktörler	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Varyans	F- Değeri	Net Toplam	Katkı	P- Değeri
GNP	3	0,923	0,308	70,862	0,910	18,926%	0,003
Sıcaklık	3	2,038	0,679	156,503	2,025	41,799%	0,001
Süre	3	0,165	0,055	12,660	0,152	3,381%	0,033
Hız	3	1,737	0,579	133,393	1,724	35,627%	0,001
Hata	3	0,013	0,004			0,267%	
Toplam	15	4,877				100,000	

5.5. RTFOT Sonrası Yumuşama Noktası Deney Sonuçları

RTFOT deneyi sonrasında karışımlara yapılmış yumuşama noktası deneyleri ile bulunan RTFOT sonrası yumuşama noktası değerleri ve L16 ortogonal dizisine uygun olarak Taguchi Yöntemi ile hesaplanmış S/N değerleri Tablo 5.14'te verilmiştir. Yumuşama noktası değerlerini minimum yapan en küçük - en iyi performans istatistiği kullanılmıştır.

Tablo 5.14. RTFOT sonrası yumuşama noktası değerleri ve S/N değerleri

Deney No	1. Numune (°C)	2. Numune (°C)	Ortalama (°C)	S/N
1	52,40	52,00	52,20	-34,35
2	53,00	55,00	54,00	-34,65
3	55,90	56,30	56,10	-34,98
4	62,80	63,10	62,95	-35,98
5	53,00	53,00	53,00	-34,49
6	57,70	54,80	56,25	-35,00
7	55,60	56,10	55,85	-34,94
8	56,00	56,60	56,30	-35,01
9	54,90	55,10	55,00	-34,81
10	54,00	54,00	54,00	-34,65
11	52,60	52,40	52,50	-34,40
12	53,60	54,20	53,90	-34,63
13	53,00	52,00	52,50	-34,40
14	52,00	52,00	52,00	-34,32
15	56,40	56,80	56,60	-35,06
16	56,10	55,80	55,95	-34,96

Hesaplanan S/N değerleri sonrası seviyelerin optimumunu bulmak için hesaplanmış ortalama S/N etkileri Tablo 5.15'te verilmiştir.

Tablo 5.15. RTFOT sonrası yumuşama noktası ortalama S/N etkileri

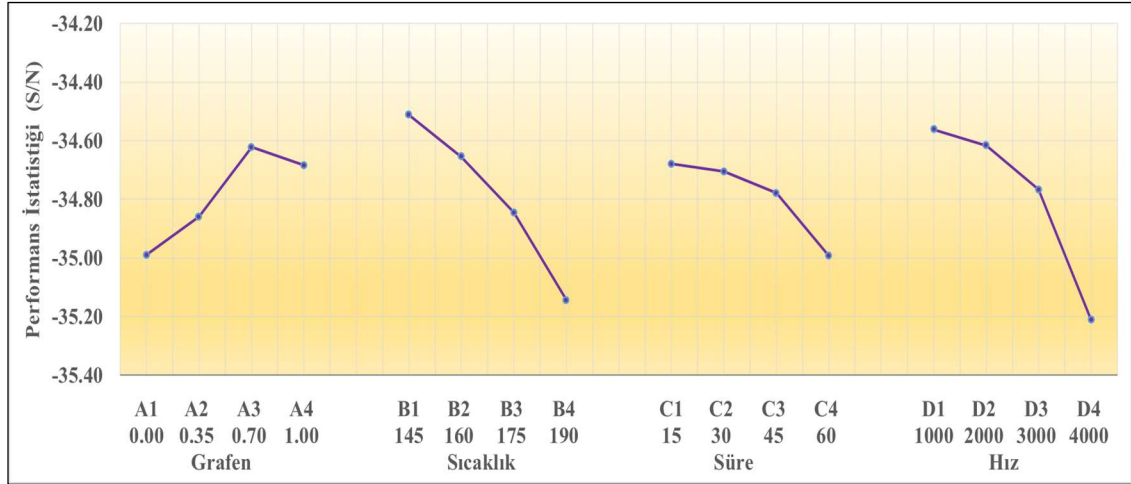
Ortalama S/N Etkileri				
	GNP	Sıcaklık	Süre	Hız
1. Seviye	-34,990	-34,512	-34,679	-34,561
2. Seviye	-34,860	-34,655	-34,705	-34,616
3. Seviye	-34,623	-34,845	-34,779	-34,767
4. Seviye	-34,684	-35,144	-34,993	-35,211

RTFOT sonrası yumuşama noktasının optimum seviyeleri Tablo 5.16’da belirtildiği gibi A3, B1, C1 ve D1 olacak şekilde belirlenmiştir. Yumuşama noktası değerine en yüksek oranda etki eden parametreler sırasıyla sıcaklık, hız, GNP oranı ve süre olmuştur. Yumuşama noktası değeri için Tablo 4.6’daki deney planı ele alındığında optimum değeri veren deneyin bulunmadığı görülmüştür. Bu yüzden belirlenen optimum penetrasyon değerini doğrulamak için belirlenen A3, B1, C1 ve D1 parametre değerlerine uygun numune hazırlanmış ve doğrulama deneyi yapılmıştır. Doğrulama deneyi sonucunda yumuşama noktası değeri 49,7 °C bulunmuştur. Bu değere denk gelen S/N değeri -33,927’dir. Bu değer %95 güven seviyesinde 34,229 ile -33,787 değerleri arasında olması gerekmektedir. 33,927 değeri 34,229 ile -33,787 değerleri arasında olduğu için sonucun %95 güven aralığında doğru olduğu belirtilebilir.

Tablo 5.16. RTFOT sonrası yumuşama noktası performans tahminleri

Faktörler	Seviye	S/N’ e olan katkıları
GNP	A3	0,167
Sıcaklık	B1	0,277
Süre	C1	0,110
Hız	D1	0,228
Tüm Faktörlerin Katkısı (S/N)		0,781
Ortalama Performans İstatistiği (S/N)		-34,789
Optimum Şartlarda Beklenen Değer (S/N) / (°C)		-34,008 / 50,164
Doğrulama Deney Sonucu (S/N) / (°C)		-33,927 / 49,700
Güven Aralığı ($\alpha=95\%$) (S/N)		-34,229 / -33,787

Şekil 5.4’te görüldüğü gibi bitümün yumuşama noktası değeri; GNP katkı maddesinin %0,70 oranına kadar azalmış, %1,0 oranında ise bir miktar artmıştır. Sıcaklık, süre ve hız arttıkça yumuşama noktası değeri artmıştır. Taguchi yöntemi ile oluşturulan deney planı dikkate alınarak yapılmış olan deneylerin sonucuna göre en düşük yumuşama noktası değeri saf bitümle eşit olarak 52,00 °C olmuştur. Yumuşama noktası değerini minimum yapan en küçük - en iyi performans istatistiği kullanılarak yumuşama noktası değerini en küçük yapan optimum seviyelere uygun hesaplanan yumuşama noktası değeri ise saf bitüme göre %3,538 azalışla 50,164 °C olmuştur.



Şekil 5.4. RTFOT sonrası yumuşama noktası tüm seviyeler için performans istatistikleri

En küçük en iyi performans istatistiği kullanılarak yumuşama noktası değerini minimize eden ANOVA sonuçları Tablo 5.17'de verilmektedir. (3,3) için F tablo değeri %95 güven seviyesinde 9,277'dir. Tüm faktörler için F değeri, %95 güven aralığı için tablodan çıkarılan F değerinden daha büyüktür. Aynı zamanda tüm faktörler için P-değeri 0,05'ten küçüktür yani model anlamlıdır. Yumuşama noktası değerine %41,119 ile en fazla katkıyı sağlayan parametre hız olmuştur. Bunu sırasıyla sıcaklık, GNP oranı ve süre izlemiştir.

Tablo 5.17. RTFOT sonrası yumuşama noktası ANOVA tablosu

Faktörler	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Varyans	F- Değeri	Net Toplam	Katkı	P- Değeri
GNP	3	0,337	0,112	20,252	0,320	13,283%	0,017
Sıcaklık	3	0,896	0,299	53,898	0,880	35,350%	0,004
Süre	3	0,243	0,081	14,624	0,227	9,592%	0,027
Hız	3	1,043	0,348	62,694	1,026	41,119%	0,003
Hata	3	0,017	0,006			0,656%	
Toplam	15	2,536				100,000	

5.6. Penetrasyon İndeksi

Bitümün sıcaklık hassasiyetinin bulunması amacıyla penetrasyon ve yumuşama noktası deneylerinden elde edilen sonuçlar ile aşağıda verilen (5.1) ve (5.2) formülleri kullanılarak Penetrasyon İndeksi (PI) hesaplanmıştır.

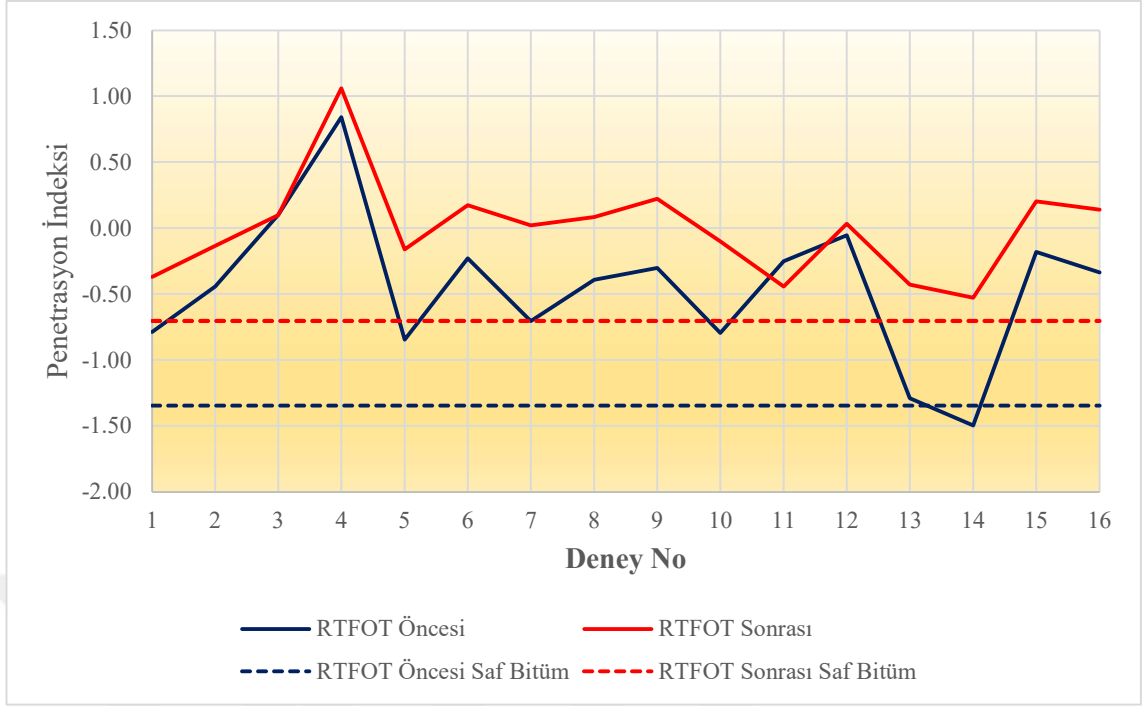
$$A = \frac{\log_{10}800 - \log_{10}P_{25}}{T_{SP} - 25} \quad (5.1)$$

$$PI = \frac{20 - 500A}{1 + 50A} \quad (5.2)$$

Formüllerdeki; P_{25} değeri bitümün 25 °C sıcaklıktaki penetrasyon değerini, T_{SP} değeri ise yumuşama noktası değerini göstermektedir. PI değerinin, -2'den küçük olması yüksek ısının duyarlılık durumunu, 2'den büyük olması ise düşük ısının duyarlılık durumunu göstermektedir (Geçkil, 2019). RTFOT öncesi ve sonrası penetrasyon indeksi sonuçları Tablo 5.18 ve Şekil 5.5'te verilmiştir.

Tablo 5.18. RTFOT öncesi ve sonrası penetrasyon indeksi sonuçları

Deney No	RTFOT Öncesi	RTFOT Sonrası
Saf Bitüm	-1,35	-0,70
1	-0,79	-0,37
2	-0,44	-0,14
3	0,10	0,10
4	0,84	1,06
5	-0,85	-0,16
6	-0,23	0,17
7	-0,71	0,02
8	-0,39	0,08
9	-0,30	0,22
10	-0,80	-0,10
11	-0,25	-0,44
12	-0,06	0,03
13	-1,29	-0,43
14	-1,50	-0,53
15	-0,18	0,20
16	-0,34	0,14



Şekil 5.5. Saf bitüm ve 16 karışımın penetrasyon indekslerinin karşılaştırması

Şekil 5.5'te görüldüğü gibi B 70/100 saf bitüme ilave edilen GNP katkı maddesinin tüm seviyelerindeki yaşlanma sonrası yani RTFOT sonrası PI değerlerinde artış görülmüştür. RTFOT öncesi yani yaşlanma öncesi PI değeri ise katkı oranının %0,70 olduğu karışımlarda artışa neden olurken, %1,00 katkı oranlı karışımlarda azalışa neden olmuştur.

GNP katkısı, daha çok yaşlanmadan sonra bitümün sıcaklığa karşı hassasiyetini azaltmıştır. Karışımların daha yüksek PI değerine sahip olması, kalıcı deformasyon haricinde düşük sıcaklık çatlamlarına karşı da daha dirençli olması demektir (Sengoz ve Isikyakar, 2008).

5.7. Parlama Noktası Deney Sonuçları

Karışımlara yapılan parlama noktası deneyleri ile bulunan parlama noktası değerleri ve L16 ortogonal dizisine uygun olarak Taguchi Yöntemi ile hesaplanmış S/N değerleri Tablo 5.19'da verilmiştir. Parlama noktası değerlerini maksimum yapan en büyük - en iyi performans istatistiği kullanılmıştır.

Tablo 5.19. Parlama noktası deneyi değerleri ve S/N değerleri

Deney No	Parlama Noktası (°C)	S/N
1	306,000	49,71
2	301,000	49,57
3	302,000	49,60
4	304,000	49,66
5	306,000	49,71
6	312,000	49,88
7	305,000	49,69
8	306,000	49,71
9	308,000	49,77
10	304,000	49,66
11	310,000	49,83
12	316,000	49,99
13	304,000	49,66
14	310,000	49,83
15	316,000	49,99
16	318,000	50,05

TS EN 22719 standardına uygun yapılan parlama noktası deneyi sonucunda bulunan parlama noktası değerleri şartname limitlerine göre min 230°C olmalıdır. Bütün karışımlara yapılan deneylerde, parlama noktası değeri 230°C'den büyük bulunmuştur.

Hesaplanan S/N değerleri sonrası seviyelerin optimumunu bulmak için hesaplanmış ortalama S/N etkileri Tablo 5.20'de verilmiştir.

Tablo 5.20. Parlama noktası için ortalama S/N etkileri

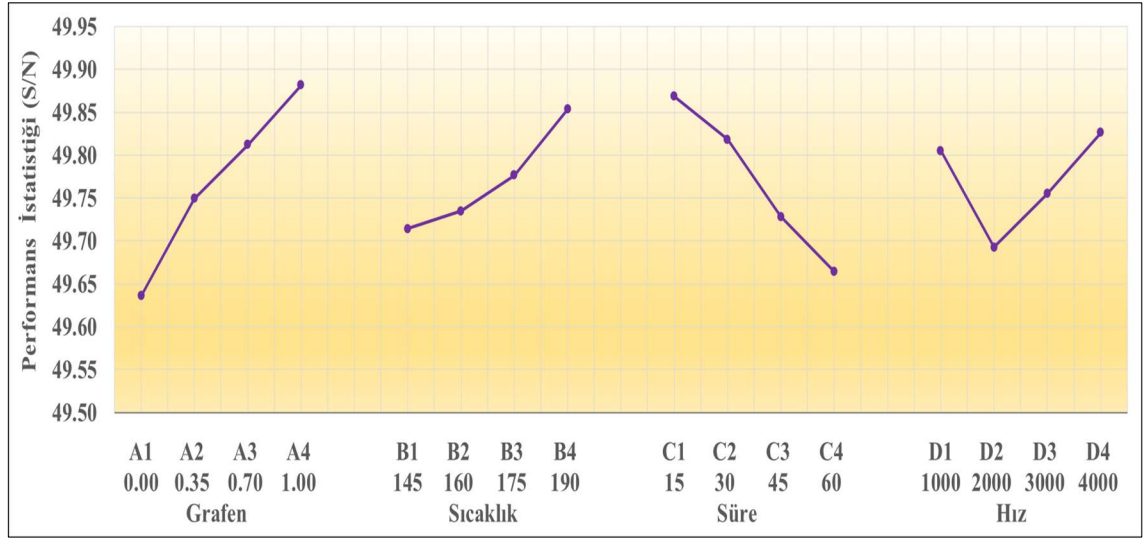
Ortalama S/N Etkileri				
	GNP	Sıcaklık	Süre	Hız
1. Seviye	49,636	49,714	49,868	49,805
2. Seviye	49,749	49,735	49,818	49,693
3. Seviye	49,812	49,777	49,728	49,755
4. Seviye	49,882	49,854	49,665	49,826

Parlama noktasının optimum seviyeleri Tablo 5.21’de belirtildiği gibi A4, B4, C1 ve D4 olacak şekilde belirlenmiştir. Parlama noktası değerine en yüksek oranda etki eden parametreler sırasıyla GNP oranı, süre, sıcaklık ve hız olmuştur.

Tablo 5.21. Parlama noktası performans tahminleri

Faktörler	Seviye	S/N’ e olan katkıları
GNP	A4	0,112
Sıcaklık	B4	0,084
Süre	C1	0,098
Hız	D4	0,056
Tüm Faktörlerin Katkısı (S/N)		0,351
Ortalama Performans İstatistiği (S/N)		49,770
Optimum Şartlarda Beklenen Değer (S/N) / (°C)		50,120 / 320,640
Güven Aralığı ($\alpha=95\%$) (S/N)		50,055 / 50,186

Şekil 5.6’da görüldüğü gibi bitümün parlama noktası değeri; GNP ve sıcaklık ile doğru orantılı olarak artarken, karıştırma süresi ile azalmıştır. Karıştırma hızının ikinci seviyesine kadar yani 2000 rpm hıza kadar azalmış, diğer seviyelerde ise artmıştır. Taguchi yöntemi ile oluşturulan deney planı dikkate alınarak yapılmış olan deneylerin sonucuna göre en büyük parlama noktası değeri saf bitüme göre %4,61 artışla 318,00 °C olmuştur. Parlama noktası değerini maksimum yapan en büyük - en iyi performans istatistiği kullanılarak parlama noktası değerini en büyük yapan optimum seviyelere uygun hesaplanan parlama noktası değeri ise saf bitüme göre %5,47 artışla 320,640 °C olmuştur.



Şekil 5.6. Parlama noktası tüm seviyeler için performans istatistikleri

Parlama noktası değerini artırmaya yönelik ANOVA sonuçları Tablo 5.22'de verilmektedir. (3,3) için F tablo değeri %95 güven seviyesinde 9,277'dir. Tüm faktörler için F değeri, %95 güven aralığı için tablodan çıkarılan F değerinden daha büyüktür. Aynı zamanda tüm faktörler için P-değeri 0,05'ten küçüktür yani model anlamlıdır. Parlama noktası değerine en fazla katkıyı sağlayan parametre %40,918 ile GNP oranı olmuştur. Bunu sırasıyla süre, sıcaklık ve hız izlemiştir.

Tablo 5.22. Parlama noktası değerleri için ANOVA tablosu

Faktörler	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Varyans	F- Değeri	Net Toplam	Katkı	P- Değeri
GNP	3	0,131	0,044	89,455	0,129	40,918%	0,002
Sıcaklık	3	0,045	0,015	31,088	0,044	14,220%	0,009
Süre	3	0,099	0,033	67,996	0,098	31,102%	0,003
Hız	3	1,043	0,014	29,083	0,041	13,303%	0,010
Hata	3	0,001	0,000			0,457%	
Toplam	15	0,320				100,000	

5.8. Elastik Geri Dönme Deney Sonuçları

Karışımlara yapılmış elastik geri dönme deneyleri ile bulunan elastik geri dönme değerleri ve L16 ortogonal dizisine uygun olarak Taguchi Yöntemi ile hesaplanmış S/N değerleri Tablo 5.23'te verilmiştir. Elastik geri dönme değerlerini maksimum yapan en büyük - en iyi performans istatistiği kullanılmıştır.

Elastik geri dönme yüzdesi (R_E) değeri aşağıda verilen (5.3) formülü kullanılarak hesaplanmıştır. R_E , %0 olduğunda malzemelerin elastik davranışının olmadığı anlamına gelmektedir. R_E , %100 olduğunda ise malzemelerin orijinal şekline geri dönebildiği anlamına gelmektedir (Błażejowski vd., 2021).

$$R_E = \frac{d}{L} 100 \quad (5.3)$$

Formüldeki; R_E değeri elastik geri dönme yüzdesini, d değeri kesilmiş numunelerin uç kısımları arasındaki uzaklığı, L ise numunelerin uzama miktarını göstermektedir.

Tablo 5.23. Elastik geri dönme deney değerleri ve S/N değerleri

Deney No	Uzama (mm)	d (mm)	R_E (%)	S/N
1	200	8	4,00	12,04
2	200	14	7,00	16,90
3	200	13	6,50	16,26
4	200	20	10,00	20,00
5	200	19	9,50	19,55
6	200	20	10,00	20,00
7	200	22	11,00	20,83
8	200	23	11,50	21,21
9	200	22	11,00	20,83
10	200	27	13,50	22,61
11	200	24	12,00	21,58
12	200	22	11,00	20,83
13	200	22	11,00	20,83
14	200	15	7,50	17,50
15	200	23	11,50	21,21
16	200	21	10,50	20,42

Hesaplanan S/N değerleri sonrası seviyelerin optimumunu bulmak için hesaplanmış ortalama S/N etkileri Tablo 5.24'te gösterilmiştir.

Tablo 5.24. Elastik geri dönme yüzdesi ortalama S/N etkileri

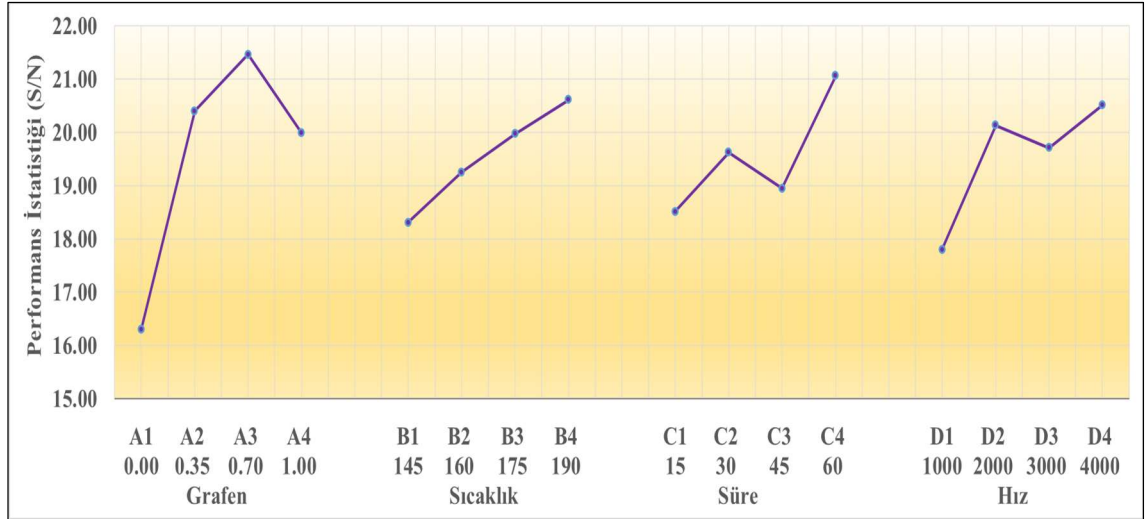
Ortalama S/N Etkileri				
	GNP	Sıcaklık	Süre	Hız
1. Seviye	16,300	18,313	18,512	17,800
2. Seviye	20,399	19,252	19,625	20,132
3. Seviye	21,462	19,971	18,950	19,711
4. Seviye	19,992	20,616	21,066	20,510

Elastik geri dönme yüzdesinin optimum seviyeleri Tablo 5.25'te belirtildiği gibi A3, B4, C4 ve D4 olacak şekilde belirlenmiştir. Elastik geri dönme yüzdesi değerine en yüksek oranda etki eden parametre GNP katkı maddesi olmuştur.

Tablo 5.25. Elastik geri dönme yüzdesi performans tahminleri

Faktörler	Seviye	S/N' e olan katkıları
GNP	A3	1,923
Sıcaklık	B4	1,078
Süre	C4	1,527
Hız	D4	0,972
Tüm Faktörlerin Katkısı (S/N)		5,501
Ortalama Performans İstatistiği (S/N)		19,538
Optimum Şartlarda Beklenen Değer (S/N) / (%)		25,039 / 17,864
Güven Aralığı ($\alpha=95\%$) (S/N)		23,784 / 26,295

Elastik geri dönme deneyi temel olarak asfalt bağlayıcıların elastik deformasyonundan sonra geri dönme yeteneğini değerlendirmek için kullanılmaktadır (Ma vd., 2020). Şekil 5.2'de görüldüğü gibi bitümün elastik geri dönme yüzdesi; GNP katkı maddesinin %0,70 oranına kadar artmış, sonra bir miktar azalmıştır. Karıştırma sıcaklığı, karıştırma hızı ve karıştırma süresi arttıkça elastik geri dönme yüzdesi artmıştır.



Şekil 5.7. Elastik geri dönme tüm seviyeler için performans istatistikleri

Elastik geri dönme değerini artırmaya yönelik ANOVA sonuçları Tablo 5.26'da verilmektedir. (3,3) için F tablo değeri %95 güven seviyesinde 9,277'dir. Tüm faktörler için F değeri, %95 güven aralığı için tablodan çıkarılan F değerinden daha büyüktür. Aynı zamanda tüm faktörler için P-değeri 0,05'ten küçüktür yani model anlamlıdır. Elastik geri dönme değerine en fazla katkıyı sağlayan parametre %57,559 ile GNP oranı olmuştur. Bunu sırasıyla hız, süre ve sıcaklık izlemiştir.

Tablo 5.26. Elastik geri dönme yüzdesi için ANOVA tablosu

Faktörler	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Varyans	F- Değeri	Net Toplam	Katkı	P- Değeri
GNP	3	60,518	20,173	113,098	59,983	57,559%	0,001
Sıcaklık	3	11,732	3,911	21,925	11,197	11,158%	0,015
Süre	3	14,955	4,985	27,949	14,420	14,224%	0,011
Hız	3	17,402	5,801	32,521	16,867	16,551%	0,009
Hata	3	0,535	0,178			0,509%	
Toplam	15	105,141				100,000	

5.9. Dönel İnce Film Isıtma Kaybı (RTFOT) Deney Sonuçları

Karışımlara yapılmış RTFOT deneyleri ile bulunan kütleli kayıp değerleri ve L16 ortogonal dizisine uygun olarak Taguchi Yöntemi ile hesaplanmış S/N değerleri Tablo 5.27'de verilmiştir. RTFOT deneyleri ile bulunan kütleli kayıp değerlerini minimum yapan en küçük - en iyi performans istatistiği kullanılmıştır.

Tablo 5.27. RTFOT kütle kaybı değerleri ve S/N değerleri

Deney No	M1 (g)	M2 (g)	Kütle Kaybı (%)	S/N
1	148,20	148,16	-0,1029	-20,24
2	148,10	148,00	-0,2890	-29,22
3	148,20	148,10	-0,2728	-28,72
4	148,60	148,58	-0,0575	-15,19
5	148,30	148,10	-0,5714	-35,14
6	148,50	148,40	-0,2709	-28,66
7	148,10	148,07	-0,0792	-17,97
8	148,30	148,29	-0,0291	-9,27
9	147,93	147,82	-0,3047	-29,68
10	147,91	147,85	-0,1869	-25,43
11	147,74	147,71	-0,0889	-18,98
12	147,83	147,81	-0,0602	-15,59
13	147,65	147,64	-0,0201	-6,08
14	148,17	148,16	-0,0298	-9,49
15	148,26	148,15	-0,3117	-29,87
16	147,61	147,61	-0,0142	-3,07

Hesaplanan S/N değerleri sonrası seviyelerin optimumunu bulmak için hesaplanmış ortalama S/N etkileri Tablo 5.28'de verilmiştir.

Tablo 5.28. RTFOT ortalama S/N etkileri

Ortalama S/N Etkileri				
	GNP	Sıcaklık	Süre	Hız
1. Seviye	-23,344	-22,786	-17,738	-15,825
2. Seviye	-22,761	-23,200	-27,455	-15,888
3. Seviye	-22,419	-23,886	-19,289	-23,091
4. Seviye	-12,131	-10,782	-16,172	-25,851

RTFOT kütle kaybı yüzdesini minimum yapan optimum seviyeleri Tablo 5.29’da belirtildiği gibi A4, B4, C4 ve D1 olacak şekilde belirlenmiştir. GNP oranı, kütle kaybına önemli derecede etki etmektedir. Katkı oranı arttıkça kütle kaybı da azalmıştır.

Tablo 5.29. RTFOT kütle kaybı performans tahminleri

Faktörler	Seviye	S/N’ e olan katkıları
GNP	A4	8,033
Sıcaklık	B4	9,381
Süre	C4	3,992
Hız	D1	4,339
Tüm Faktörlerin Katkısı (S/N)		25,745
Ortalama Performans İstatistiği (S/N)		-20,164
Optimum Şartlarda Beklenen Değer (S/N) / (‰)		5,582 / 0,526
Doğrulama Deney Sonucu (S/N) / (‰)		4,257 / 0,613
Güven Aralığı ($\alpha=95\%$) (S/N)		1,660 / 9,503

Karıştırma süresi ve karıştırma hızının katkı oranına ve karıştırma sıcaklığına göre çok daha az etki ettiği görülmüştür. RTFOT kütle kaybı, bitümün maruz kaldığı oksidatif yaşlanma ve sertleşme miktarının önemli bir belirtisidir. GNP katkı maddesi saf bitümü yaşlanmaya karşı daha dayanıklı duruma getirerek kaplamanın performansında artma görülmüştür ayrıca durabilite ve esneklik özelliklerinde iyileşme görülmüştür.

En küçük - en iyi performans istatistiği kullanılarak RTFOT kütle kaybı değerini minimize eden ANOVA sonuçları Tablo 5.30'da verilmiştir. (3,3) için F tablo değeri %95 güven seviyesinde 9,277'dir. Tüm faktörler için F değeri, %95 güven aralığı için tablodan çıkarılan F değerinden daha büyüktür. Aynı zamanda tüm faktörler için P-değeri 0.05'ten küçüktür yani model anlamlıdır. RTFOT kütle kaybı değerine %32,794 ile en fazla katkıyı sağlayan parametre sıcaklık olmuştur. Bunu sırasıyla GNP oranı, hız ve süre izlemiştir.

Tablo 5.30. RTFOT kütle kaybı için ANOVA tablosu

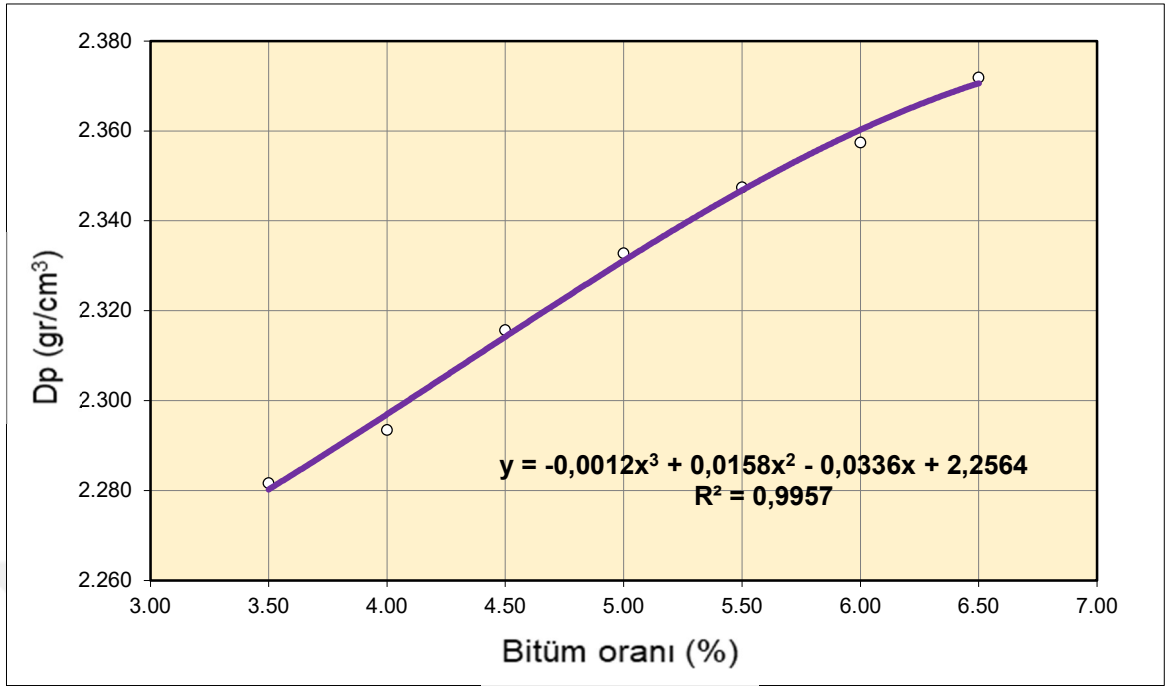
Faktörler	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Varyans	F-Değeri	Net Toplam	Katkı	P-Değeri
GNP	3	345,893	115,298	57,863	339,915	24,040%	0,004
Sıcaklık	3	471,856	157,285	78,935	465,878	32,794%	0,002
Süre	3	303,003	101,001	50,688	297,025	21,059%	0,005
Hız	3	312,104	104,035	52,211	306,126	21,691%	0,004
Hata	3	5,978	1,993			0,415%	
Toplam	15	1.438,833				100,000	

5.10. Marshall Tasarım Deney Sonuçları

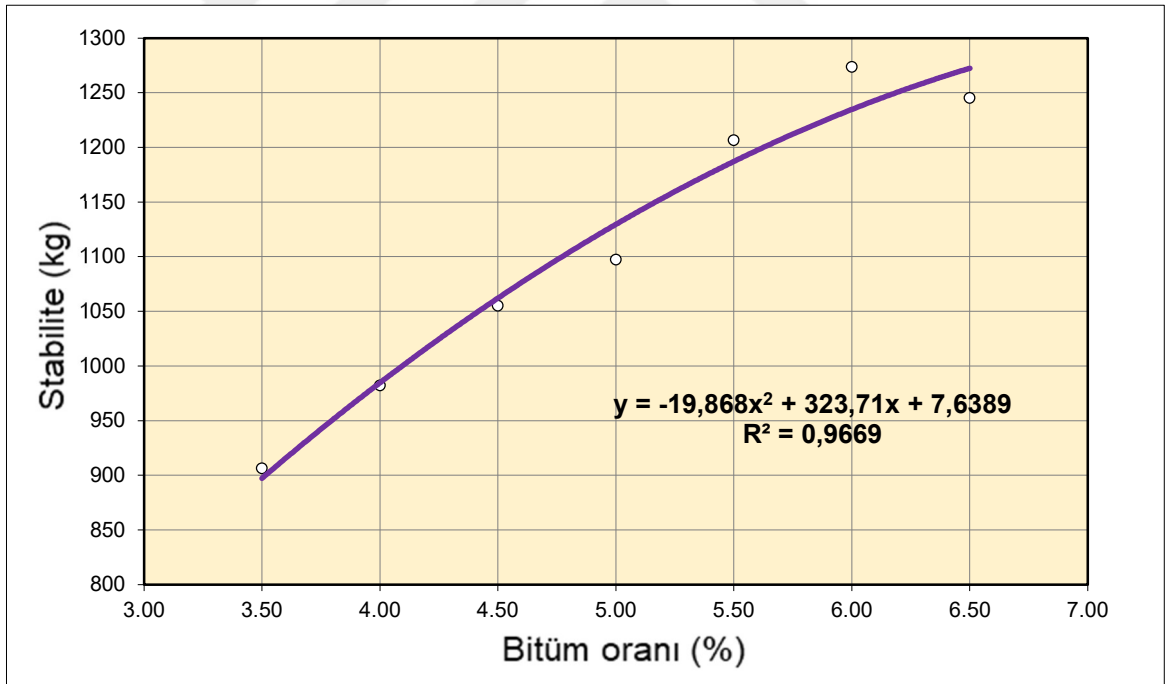
Karışımlara yapılmış Marshall tasarım deneyi ile optimum bitüm oranı tayini için, karışımlarda kullanılan agrega oranları sabit tutulup, agreganın ağırlığınca %3,5 ila %6,5 aralığında 7 farklı oranda bitüm eklenmiş ve her oran için 1 set 3'er numune olacak şekilde toplamda $7 \times 3 = 21$ adet Marshall numunesi hazırlanmıştır. Daha sonra Marshall tasarım deneyi uygulanarak numunelerin stabilite ve akma değerleri bulunmuştur. Bulunan sonuçlar ve hesaplamalar 5.31'de verilmiştir. Şekil 5.8 - 5.13'deki grafiklerin oluşturulmasından sonra gereken hesaplamalar yapıp boşluk oranının %4'e karşılık geldiği ve stabilitenin maksimum değere denk geldiği bitüm oranı %4,96 olarak bulunmuştur.

Tablo 5.31. Optimum bitüm oranı için Marshall tasarım deney sonuçları

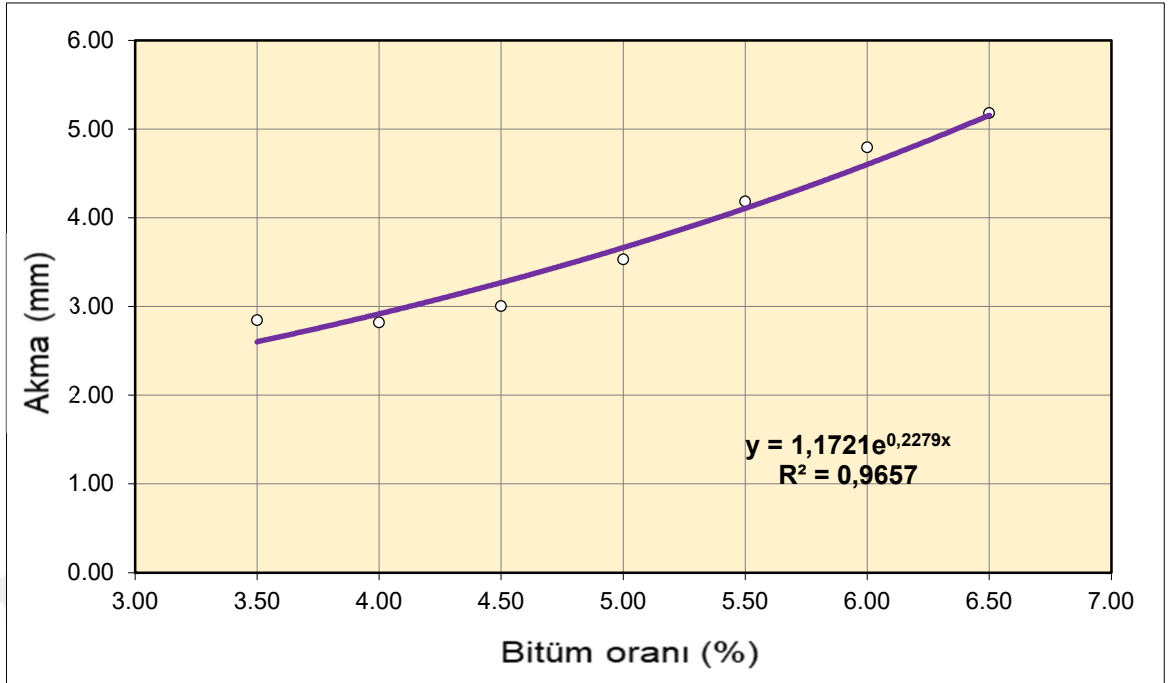
Deney No	Bitüm Oranı (%)	Bitüm Ağırlığı (g)	h ₁ (mm)	h ₂ (mm)	h ₃ (mm)	h _{ort} (mm)	W _{hava} (g)	W _{su} (g)	W _{doy.} (g)	V (cm ³)	D _p (g/cm ³)	D _t (g/cm ³)	V _a (%)	VMA (%)	VFA (%)	Akma (mm)	Stabilite (kg)	Düz. Faktörü	Düz. Stabilite (kg)
1	3,50	40,25	65,20	65,30	65,50	65,33	1.174,7	676,0	1.192,4	516,4	2,275					2,88	972,47	0,957	930,92
2	3,50	40,25	66,10	66,30	66,40	66,27	1.174,8	678,4	1.194,7	516,3	2,275					2,83	891,00	0,938	835,46
3	3,50	40,25	65,50	65,40	65,20	65,37	1.169,8	681,2	1.191,0	509,8	2,295					2,81	996,57	0,957	953,28
									Ortalama		2,282	2,477	7,877	14,911	47,177	2,84			906,55
4	4,00	46,00	65,70	65,80	65,60	65,70	1.174,1	679,4	1.192,0	512,6	2,290					2,84	965,15	0,950	916,45
5	4,00	46,00	65,60	65,10	65,20	65,30	1.174,5	677,5	1.193,2	515,7	2,277					2,92	1.072,00	0,958	1.026,96
6	4,00	46,00	65,90	66,00	66,00	65,97	1.180,0	683,9	1.194,2	510,3	2,312					2,70	1.062,93	0,944	1.003,36
									Ortalama		2,293	2,460	6,763	14,881	54,553	2,82			982,25
7	4,50	51,75	64,00	64,40	64,40	64,27	1.180,8	681,0	1.188,2	507,2	2,328					2,89	1.107,00	0,981	1.085,69
8	4,50	51,75	65,00	64,90	64,80	64,90	1.166,0	672,8	1.179,1	506,3	2,303					3,09	1.068,21	0,967	1.032,52
9	4,50	51,75	64,30	64,50	64,60	64,47	1.175,6	678,4	1.186,0	507,6	2,316					3,04	1.073,38	0,976	1.047,83
									Ortalama		2,316	2,443	5,223	14,467	63,897	3,00			1.055,35
10	5,00	57,50	64,90	65,00	64,80	64,90	1.183,2	680,9	1.190,7	509,8	2,321					3,46	1.115,59	0,967	1.078,32
11	5,00	57,50	64,60	64,80	64,90	64,77	1.182,2	680,4	1.183,6	503,2	2,349					3,63	1.137,21	0,970	1.102,54
12	5,00	57,50	64,90	64,50	64,60	64,67	1.181,9	679,2	1.186,9	507,7	2,328					3,51	1.143,68	0,972	1.111,34
									Ortalama		2,333	2,427	3,891	14,247	72,693	3,53			1.097,40
13	5,50	63,25	63,20	63,50	63,40	63,37	1.182,7	682,4	1.184,4	502,0	2,356					4,14	1.211,94	1,002	1.214,78
14	5,50	63,25	63,30	62,80	63,30	63,13	1.176,4	677,0	1.178,8	501,8	2,344					4,20	1.177,00	1,008	1.186,72
15	5,50	63,25	63,60	63,20	63,60	63,47	1.184,6	680,4	1.186,2	505,8	2,342					4,22	1.219,00	1,000	1.218,81
									Ortalama		2,347	2,411	2,652	14,115	81,212	4,18			1.206,77
16	6,00	69,00	63,90	63,60	63,70	63,73	1.193,4	686,5	1.195,2	508,7	2,346					4,63	1.270,55	0,993	1.262,06
17	6,00	69,00	63,10	63,30	63,10	63,17	1.193,9	690,5	1.194,9	504,4	2,367					4,98	1.282,74	1,007	1.292,24
18	6,00	69,00	62,70	62,80	63,00	62,83	1.180,1	681,1	1.181,3	500,2	2,359					4,77	1.247,00	1,016	1.267,02
									Ortalama		2,357	2,396	1,610	14,158	88,625	4,79			1.273,77
19	6,50	74,75	62,30	62,40	62,90	62,53	1.186,9	689,1	1.118,8	499,7	2,375					5,31	1.239,20	1,024	1.269,04
20	6,50	74,75	63,00	62,60	62,70	62,77	1.189,2	688,4	1.190,1	501,7	2,370					5,20	1.211,51	1,018	1.233,10
21	6,50	74,75	62,70	62,80	63,10	62,87	1.193,5	690,7	1.194,3	503,6	2,370					5,03	1.215,00	1,015	1.233,44
									Ortalama		2,372	2,381	0,381	14,038	97,285	5,18			1.245,19
Şartname Limitleri													4-6	13-15	60-75	2-4			> 750



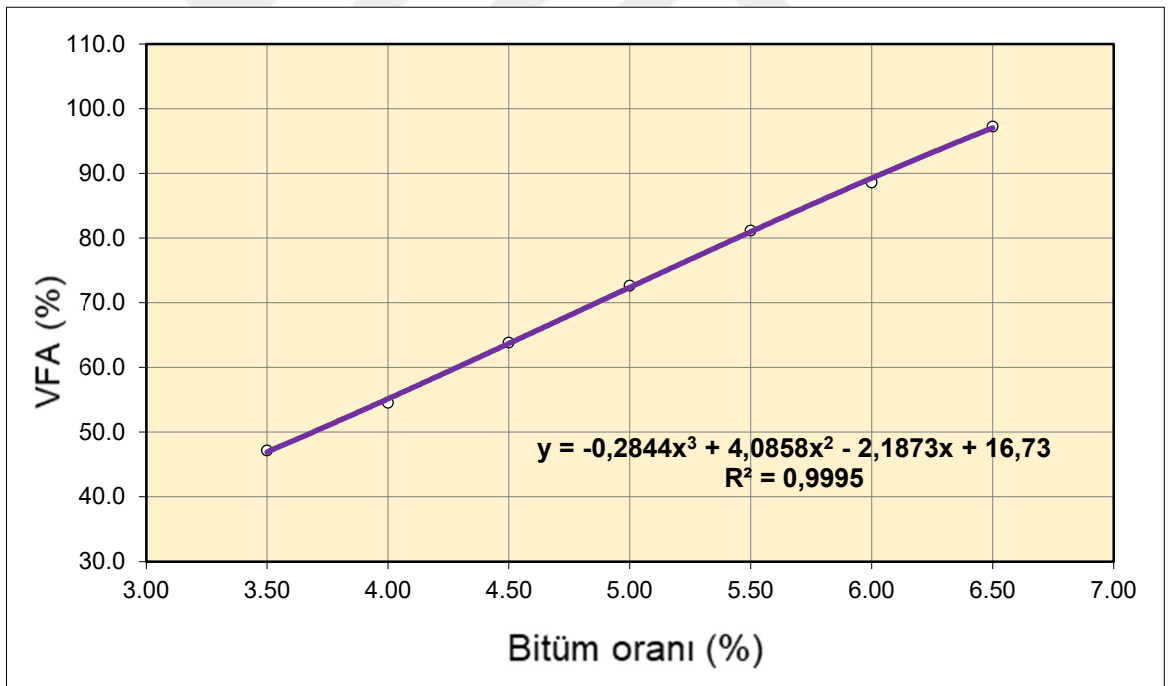
Şekil 5.8. Dp – Bitüm oranı



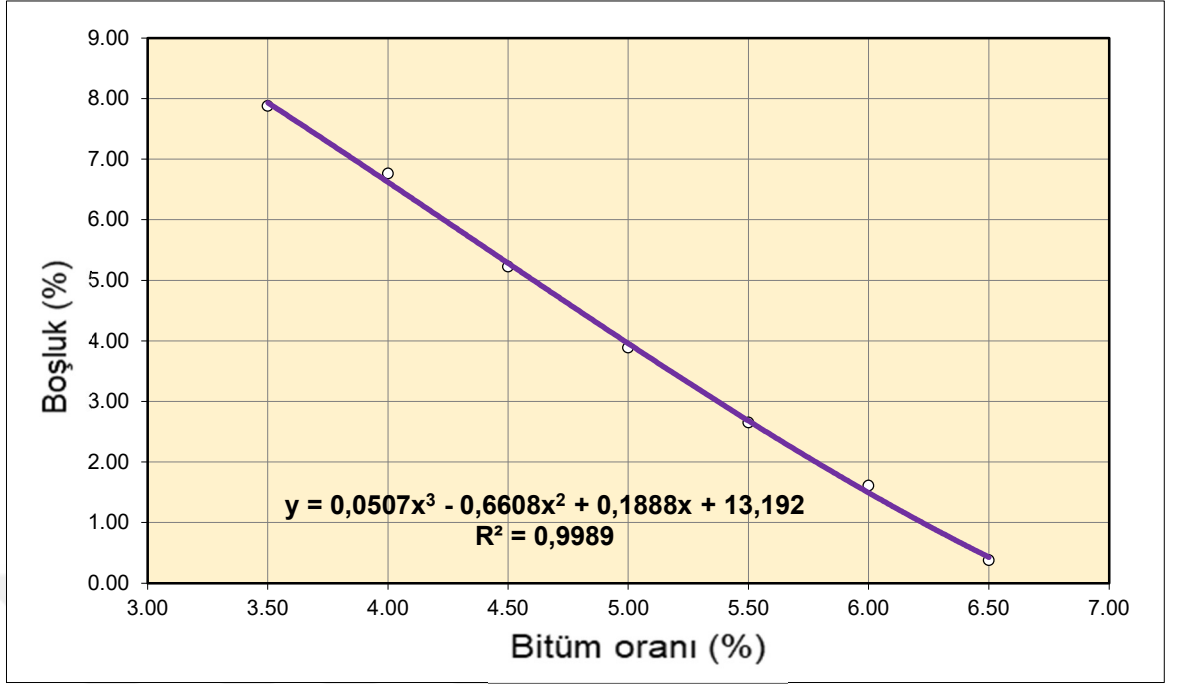
Şekil 5.9. Stabilite – Bitüm oranı



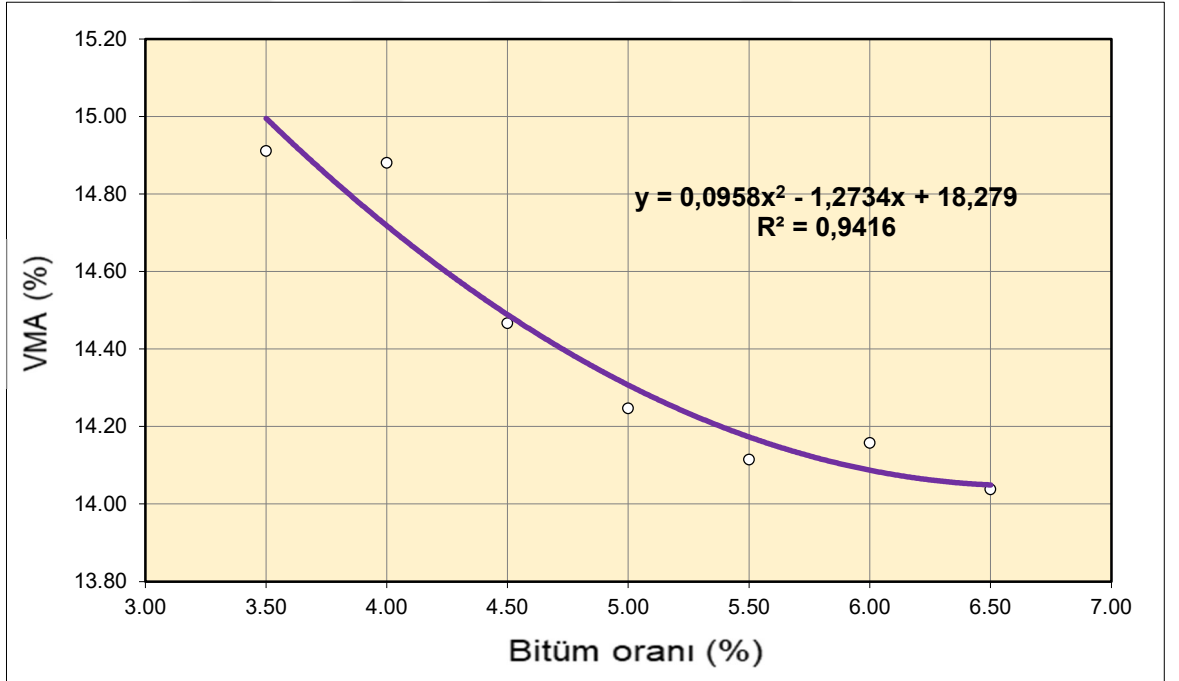
Şekil 5.10. Akma – Bitüm oranı



Şekil 5.11. VFA – Bitüm oranı



Şekil 5.12. Boşluk oranı – Bitüm oranı



Şekil 5.13. VMA – Bitüm oranı

Belirlenen optimum bitüm yüzdesi ile deney planına göre her bir karışım için 1 set 3'er numune olacak şekilde toplamda $16 \times 3 = 48$ adet Marshall numunesi hazırlanmıştır. Daha sonra Marshall tasarım deneyi uygulanarak numunelerin stabilite ve akma değerleri bulunmuştur. Bulunan sonuçlar ve hesaplamalar 5.32'de verilmiştir.

Tablo 5.32. Optimum bitüm yüzdesi ile Marshall tasarım deney sonuçları

Deney No	h ₁ (mm)	h ₂ (mm)	h ₃ (mm)	h _{ort.} (mm)	W _{hava} (g)	W _{su} (g)	W _{doy.} (g)	V (cm ³)	D _p (g/cm ³)	D _t (g/cm)	V _h (%)	VMA (%)	VFA (%)	Akma (mm)	Stabilite (kg)	Düz. Fak.	Düz. Stabilite (kg)	M/Q (kg/mm)
1A	64,10	63,90	64,20	64,07	1.186,9	683,3	1.188,3	505,0	2,350					3,59	989	0,99	974	
1B	65,10	65,00	64,60	64,90	1.190,8	683,0	1.192,6	509,6	2,337					3,75	1.000	0,97	967	
1C	64,30	64,30	64,30	64,30	1.179,1	678,1	1.183,6	505,5	2,333					3,47	1.016	0,98	996	
									2,340	2,43	3,65	13,95	73,85	3,60			979	272
2A	64,90	64,90	65,00	64,93	1.185,4	680,4	1.189,2	508,8	2,330					3,34	954	0,97	922	
2B	64,60	64,60	64,70	64,63	1.187,6	681,1	1.191,5	510,4	2,327					3,40	916	0,97	891	
2C	64,60	64,90	64,90	64,80	1.181,0	680,2	1.189,1	508,9	2,321					3,50	964	0,97	934	
									2,326	2,43	4,23	14,47	70,78	3,41			915	268
3A	66,80	66,50	66,50	66,60	1.201,7	686,7	1.205,5	518,8	2,316					3,95	809	0,93	752	
3B	66,70	66,60	66,50	66,60	1.197,7	683,9	1.206,8	522,9	2,290					3,90	793	0,93	738	
3C	66,30	66,00	66,00	66,10	1.195,6	686,7	1.205,2	518,5	2,306					4,01	805	0,94	758	
									2,304	2,43	5,12	15,26	66,49	3,95			749	190
4A	64,70	64,50	64,30	64,50	1.191,5	681,4	1.196,4	515,0	2,314					3,88	1.125	0,98	1.097	
4B	64,80	64,80	64,90	64,83	1.182,2	679,9	1.189,9	510,0	2,318					3,85	1.110	0,97	1.074	
4C	64,20	64,60	64,60	64,47	1.184,5	679,6	1.189,8	510,2	2,322					3,79	1.140	0,98	1.113	
									2,318	2,43	4,56	14,77	69,13	3,84			1.095	285
5A	65,40	65,60	65,60	65,53	1.194,1	684,9	1.196,2	511,3	2,335					2,80	990	0,95	944	
5B	65,10	65,10	65,30	65,17	1.192,3	681,8	1.194,2	512,4	2,327					3,01	934	0,96	898	
5C	64,80	64,80	64,70	64,77	1.192,8	684,5	1.195,0	510,5	2,337					2,88	941	0,97	912	
									2,333	2,43	3,93	14,21	72,32	2,90			918	317
6A	64,40	64,30	64,30	64,33	1.181,5	679,0	1.186,4	507,4	2,329					3,05	1.152	0,98	1.128	
6B	64,30	64,30	64,20	64,27	1.182,4	680,5	1.187,6	507,1	2,332					2,90	1.167	0,98	1.145	
6C	63,90	63,90	63,80	63,87	1.184,5	681,3	1.189,9	508,6	2,329					2,95	1.097	0,99	1.086	
									2,330	2,43	4,07	14,33	71,62	2,97			1.119	377
7A	65,60	65,60	65,70	65,63	1.199,6	684,7	1.204,6	519,9	2,307					3,43	751	0,95	714	
7B	65,50	65,50	65,70	65,57	1.198,8	687,2	1.200,5	513,3	2,335					3,52	759	0,95	722	
7C	65,70	65,50	65,60	65,60	1.191,9	682,5	1.199,0	516,5	2,308					3,21	748	0,95	712	
									2,317	2,43	4,60	14,80	68,94	3,39			716	211
8A	65,50	65,50	65,40	65,47	1.196,5	683,8	1.202,9	519,1	2,305					3,32	1.195	0,95	1.141	
8B	64,80	64,70	64,70	64,73	1.196,0	684,9	1.197,8	512,9	2,332					3,29	1.206	0,97	1.170	
8C	64,10	64,00	64,00	64,03	1.193,8	686,8	1.196,4	509,6	2,343					3,20	1.146	0,99	1.130	
									2,326	2,43	4,20	14,45	70,93	3,27			1.147	351
Şartname Limitleri											4-6	13-15	60-75	2-4			> 750	

Tablo 5.32. “Devam”

Deney No	h ₁ (mm)	h ₂ (mm)	h ₃ (mm)	h _{ort.} (mm)	W _{hava} (g)	W _{su} (g)	W _{doy.} (g)	V (cm ³)	D _p (g/cm ³)	t _t (g/cm)	V _h (%)	VMA (%)	VFA (%)	Akma (mm)	Stabilite (kg)	Düz. Fak.	Düz. Stabilite (kg)	M/Q (kg/mm)
9A	64,10	64,30	64,00	64,13	1.190,3	684,0	1.191,8	507,8	2,344					2,43	1.082	0,98	1.064	
9B	64,10	63,80	63,80	63,90	1.189,0	681,8	1.191,2	509,4	2,334					2,82	1.043	0,99	1.031	
9C	64,30	64,50	64,40	64,40	1.191,9	685,9	1.193,5	507,6	2,348					2,73	1.114	0,98	1.089	
									2,342	2,43	3,56	13,87	74,36	2,66			1.062	399
10A	65,10	65,30	65,40	65,27	1.190,1	681,6	1.195,9	514,3	2,314					2,63	1.111	0,96	1.065	
10B	64,30	64,50	64,30	64,37	1.192,3	683,3	1.194,2	510,9	2,334					2,75	1.087	0,98	1.064	
10C	64,50	64,60	64,60	64,57	1.187,4	680,5	1.190,4	509,9	2,329					2,55	1.055	0,97	1.027	
									2,325	2,43	4,24	14,48	70,72	2,64			1.052	298
11A	63,70	63,90	63,90	63,83	1.186,4	679,3	1.194,2	514,9	2,304					3,11	1.009	0,99	1.000	
11B	63,50	63,70	63,50	63,57	1.185,7	682,1	1.193,9	511,8	2,317					2,82	975	1,00	973	
11C	63,50	63,30	63,30	63,37	1.184,3	682,4	1.190,4	508,0	2,331					3,10	1.005	1,00	1.008	
									2,317	2,43	4,57	14,78	69,06	3,01			994	330
12A	65,80	65,90	65,90	65,87	1.195,8	684,8	1.201,7	516,9	2,313					3,27	913	0,95	864	
12B	65,60	65,60	65,50	65,57	1.197,2	686,0	1.200,9	514,9	2,325					3,06	875	0,95	833	
12C	65,00	65,00	65,00	65,00	1.193,8	684,7	1.197,8	513,1	2,327					3,40	892	0,96	860	
									2,322	2,43	4,39	14,62	69,94	3,24			852	263
13A	65,00	64,90	64,70	64,87	1.187,3	681,0	1.191,3	510,3	2,327					2,68	885	0,97	856	
13B	64,90	64,80	64,90	64,87	1.189,2	683,5	1.191,0	507,5	2,343					2,56	927	0,97	897	
13C	64,60	64,50	64,60	64,57	1.191,9	684,5	1.194,0	509,5	2,339					2,81	902	0,97	879	
									2,336	2,43	3,79	14,08	73,08	2,68			877	327
14A	65,20	65,40	65,00	65,20	1.186,3	683,9	1.191,6	507,7	2,337					3,32	746	0,96	716	
14B	64,80	65,00	64,70	64,83	1.182,6	677,0	1.186,4	509,4	2,322					3,27	742	0,97	718	
14C	64,70	64,80	64,60	64,70	1.183,3	680,4	1.188,1	507,7	2,331					3,07	702	0,97	682	
									2,330	2,43	4,07	14,33	71,60	3,22			705	219
15A	67,00	67,00	67,00	67,00	1.191,1	683,8	1.200,3	516,5	2,306					3,23	621	0,92	572	
15B	66,60	66,70	66,60	66,63	1.191,8	682,2	1.200,8	518,6	2,298					3,44	616	0,93	573	
15C	66,50	66,60	66,50	66,53	1.192,2	683,1	1.199,6	516,5	2,308					3,55	583	0,93	543	
									2,304	2,43	5,12	15,27	66,47	3,41			563	165
16A	65,30	65,30	65,40	65,33	1.194,2	682,1	1.197,8	515,7	2,316					3,51	1.012	0,96	969	
16B	65,00	65,00	65,10	65,03	1.194,2	681,9	1.197,0	515,1	2,318					3,60	1.017	0,96	980	
16C	66,10	66,10	66,20	66,13	1.194,0	681,2	1.200,2	519,0	2,301					3,42	1.024	0,94	963	
									2,312	2,43	4,81	14,99	67,90	3,51			971	277
Şartname Limitleri											4-6	13-15	60-75	2-4			> 750	

Karışımlara yapılan Marshall tasarım deneyleri ile bulunan Marshall stabilite değerleri ve L16 ortogonal dizisine uygun olarak Taguchi Yöntemi ile hesaplanmış S/N değerleri Tablo 5.33'te verilmiştir. Marshall stabilite değerlerini maksimum yapan en büyük - en iyi performans istatistiği kullanılmıştır.

Tablo 5.33. Marshall stabilite değerleri ve S/N değerleri

Deney No	1. Numune (kg)	2. Numune (kg)	3. Numune (kg)	Ortalama (kg)	S/N
1	974,21	966,75	995,59	978,85	59,81
2	921,68	890,81	933,88	915,45	59,23
3	752,43	737,87	757,84	749,38	57,49
4	1097,30	1074,29	1113,31	1094,97	60,79
5	943,95	897,57	912,24	917,92	59,26
6	1127,65	1144,56	1086,04	1119,42	60,98
7	713,93	722,47	711,81	716,07	57,10
8	1140,94	1169,71	1130,36	1147,00	61,19
9	1064,36	1031,49	1089,22	1061,69	60,52
10	1065,33	1064,06	1027,16	1052,18	60,44
11	1000,26	972,70	1007,70	993,55	59,94
12	863,52	833,05	859,90	852,15	58,61
13	856,12	896,59	878,54	877,08	58,86
14	716,32	718,25	681,88	705,48	56,97
15	572,33	572,69	543,44	562,82	55,01
16	968,75	979,65	963,33	970,58	59,74

Hesaplanan S/N değerleri sonrası seviyelerin optimumunu bulmak için hesaplanmış stabilite üzerindeki ortalama S/N etkileri Tablo 5.34'te verilmiştir

Tablo 5.34. Marshall stabilite ortalama S/N etkileri

Ortalama S/N Etkileri				
	GNP	Sıcaklık	Süre	Hız
1. Seviye	59,332	59,613	60,120	58,123
2. Seviye	59,632	59,406	58,027	59,807
3. Seviye	59,879	57,386	59,044	59,233
4. Seviye	57,645	60,083	59,297	59,324

Marshall stabilitesini maksimum yapan optimum seviyeler Tablo 5.35'te belirtildiği gibi A3, B4, C1, D2 olacak şekilde belirlenmiştir. Marshall stabilite değerine en yüksek oranda etki eden parametre 0,998 değeri ile karıştırma süresi olmuştur ve bunu sırasıyla karıştırma sıcaklığı, GNP oranı ve karıştırma hızı olmuştur. Marshall stabilite değeri için Tablo 4.6'daki deney planı ele alındığında optimum değeri veren deneyin bulunmadığı görülmüştür. Bu yüzden belirlenen optimum Marshall stabilite değerini doğrulamak için parametrelerin A3, B4, C1 ve D2 seviye değerlerine uygun numune hazırlanmış ve doğrulama deneyi yapılmıştır. Doğrulama deneyinin sonucunda 1280,39 kg stabilite değeri bulunmuştur. Bu değere denk gelen S/N değeri 62,147 'tır. Bu değer %95 güven seviyesinde 61,899 ile 63,146 değerleri arasında olması gerekmektedir. 1280,39 değeri 61,899 ile 63,146 değerleri arasında olduğu için, sonucun %95 güven aralığında doğru olduğu belirtilebilir.

Tablo 5.35. Marshall stabilite performans tahminleri

Faktörler	Seviye	S/N' e olan katkıları
GNP	A3	0,757
Sıcaklık	B4	0,961
Süre	C1	0,998
Hız	D2	0,685
Tüm Faktörlerin Katkısı (S/N)		3,401
Ortalama Performans İstatistiği (S/N)		59,122
Optimum Şartlarda Beklenen Değer (S/N) / (kg)		62,523 / 1337,016
Doğrulama Deney Sonucu (S/N) / (kg)		62,147 / 1280,390
Güven Aralığı ($\alpha=95\%$) (S/N)		61,899 / 63,146

Stabilite değeri, bitümlü sıcak karışım uygulamalı kaplamanın deformasyona karşı koyduğu maksimum yükü; akma değeri ise maksimum yüke ulaştığında düşeyde oluşan deformasyonu belirtmektedir (Geçkil, Aksağan, vd., 2021). Stabilite değeri GNP katkı maddesinin %0,70 oranına kadar artmış, %1,0 oranında ise azalmıştır. Taguchi yöntemi ile oluşturulan deney planı dikkate alınarak yapılmış olan deneylerin sonucuna göre en yüksek stabilite değeri saf bitüm ile hazırlanan karışıma göre %4,406 artışla 1147,00 kg olmuştur. Stabilite değerini maksimum yapan en büyük - en iyi performans istatistiği kullanılarak stabilite değerini en büyük yapan optimum seviyelere uygun hesaplanan stabilite değeri ise saf bitüm ile hazırlanan karışımlara göre %21,702 artışla 1337,02 kg olmuştur.

Katkı maddesi olan GNP kullanımının 0,70 oranına kadar artması ile akma değeri azalmıştır, Marshall katsayısı (MQ) oranı ise artmıştır. MQ, karışımların sertlik durumuna ve aynı zamanda tekerlek izi ve çeşitli deformasyonlara karşı dirençlerini gösteren önemli bir parametredir (Geçkil, Önal, vd., 2021; Adnan vd., 2022). GNP katkı maddesinin karışımlara farklı oranlarda eklenmesi ile, MQ yükselerek kalıcı deformasyona karşı daha fazla direnç sağlamıştır.

Marshall stabilitesini artırmaya yönelik ANOVA sonuçları Tablo 5.36'da verilmektedir. (3,3) için F tablo değeri %95 güven seviyesinde 9,277'dir. Tüm faktörler için F değeri, %95 güven aralığı için tablodan çıkarılan F değerinden daha büyüktür. Aynı zamanda tüm faktörler için P-değeri 0,05'ten küçüktür yani model anlamlıdır. Marshall stabilite değerine en fazla katkıyı sağlayan parametre %38,350 ile sıcaklık olmuştur. Bunu sırasıyla GNP oranı, süre ve hız izlemiştir.

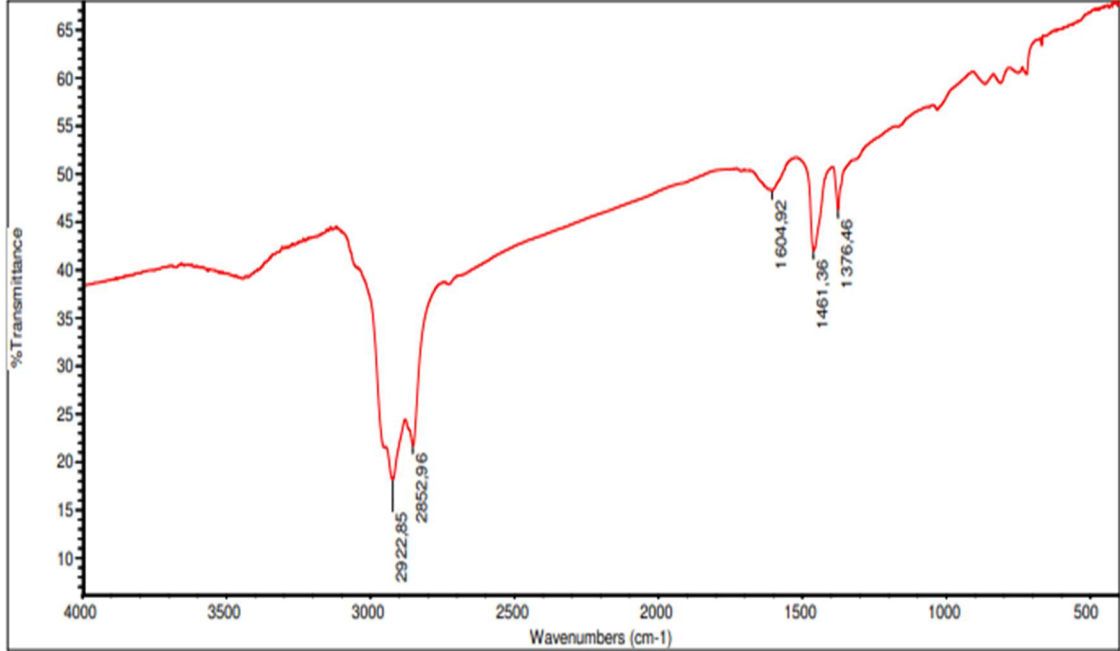
Tablo 5.36. Marshall stabilite ANOVA tablosu

Faktörler	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Varyans	F-Değeri	Net Toplam	Katkı	P-Değeri
GNP	3	12,238	4,079	92,820	12,106	27,559%	0,002
Sıcaklık	3	17,030	5,677	129,166	16,899	38,350%	0,001
Süre	3	8,928	2,976	67,713	8,796	20,104%	0,003
Hız	3	6,079	2,026	46,106	5,947	13,689%	0,005
Hata	3	0,132	0,044			0,297%	
Toplam	15	44,407				100,000	

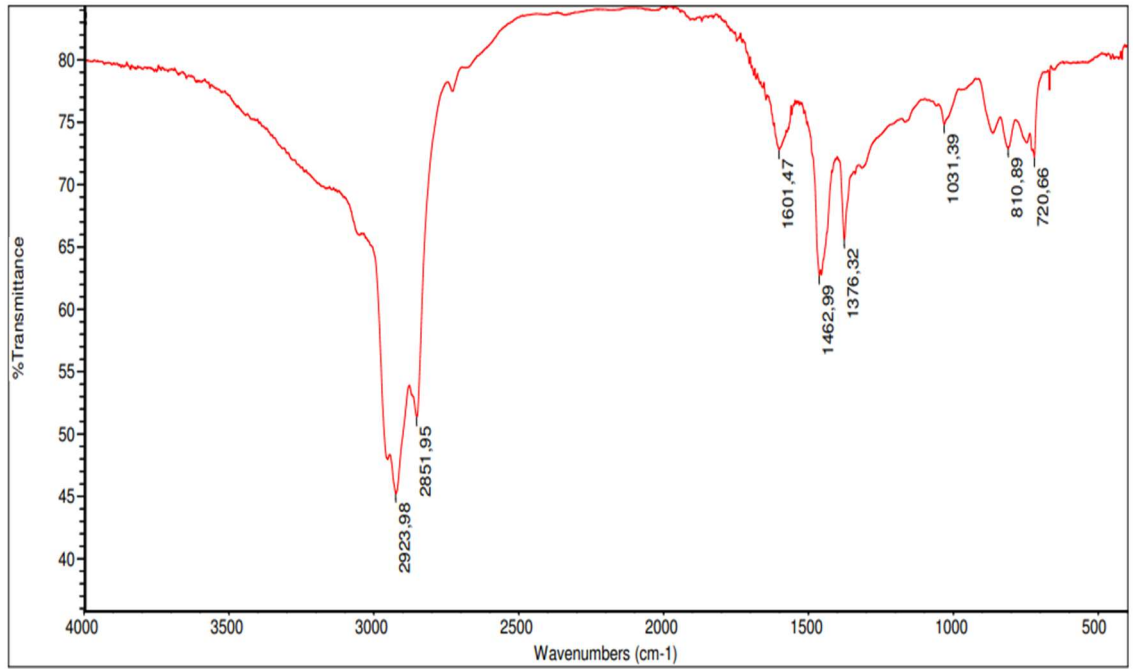
5.11. Fourier Dönüşümü Kızılötesi Spektroskopisi (FT-IR) Deney Sonuçları

Saf bitüm ile beraber Tablo 4.6’da verilen deney planındaki 16 farklı karışımdan Deney 4, Deney 6, Deney 13 ve Deney 16 karışımlarından alınan numuneler üzerinde FT-IR analizi gerçekleştirilmiştir. Deney 4 (A1, B4, C4, D4); %0 oranında GNP, 190°C karıştırma sıcaklığı, 60 dakika karıştırma süresi ve 4000 rpm karıştırma hızı seviyeleri kullanılarak modifiye bitüm hazırlanmıştır. Deney 6 (A2, B2, C1, D4); %0,35 oranında GNP, 160°C karıştırma sıcaklığı, 15 dakika karıştırma süresi ve 4000 rpm karıştırma hızı seviyeleri kullanılarak modifiye bitüm hazırlanmıştır. Deney 13 (A3, B4, C2, D1); %0,70 oranında GNP, 190°C karıştırma sıcaklığı, 30 dakika karıştırma süresi ve 1000 rpm karıştırma hızı seviyeleri kullanılarak modifiye bitüm hazırlanmıştır. Deney 16 (A4, B4, C1, D3); %1,00 oranında GNP, 190°C karıştırma sıcaklığı, 15 dakika karıştırma süresi ve 3000 rpm karıştırma hızı seviyeleri kullanılarak modifiye bitüm hazırlanmıştır.

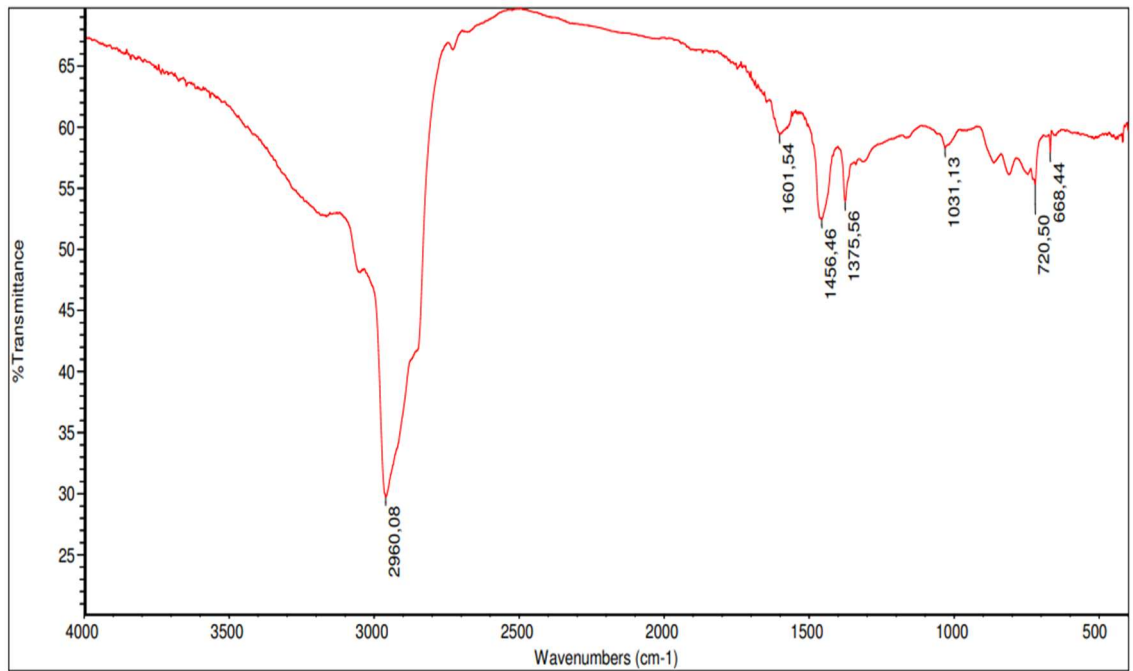
FT-IR deney sonuçları; FT-IR deneyi sonucunda elde edilen Şekil 5.14 – 5.18’de grafiklerden yorumlanmıştır.



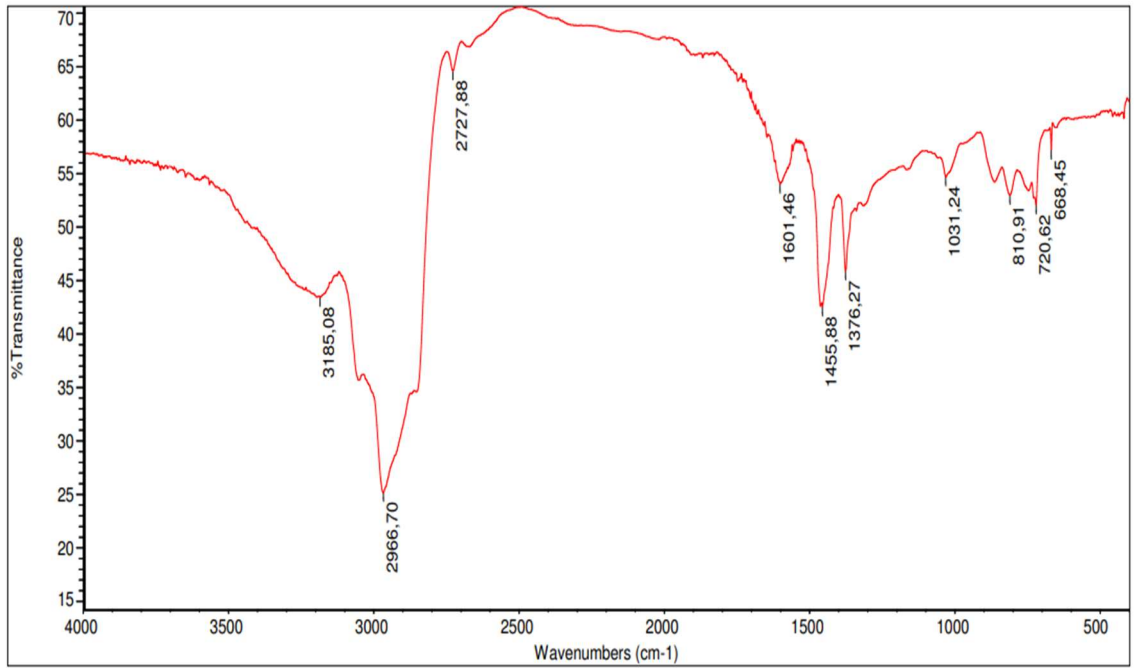
Şekil 5.14. Saf bitüm FT-IR deney sonucu



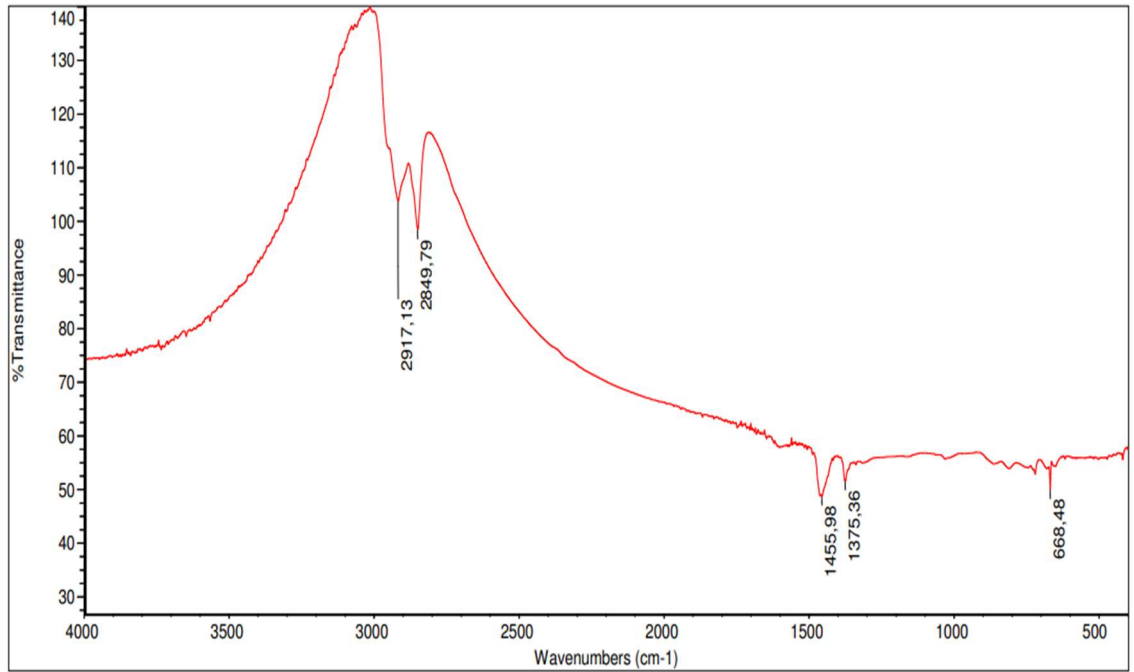
Şekil 5.15. Deney 4 modifiye bitüm FT-IR deney sonucu



Şekil 5.16. Deney 6 modifiye bitüm FT-IR deney sonucu



Şekil 5.17. Deney 13 modifiye bitüm FT-IR deney sonucu



Şekil 5.18. Deney 16 modifiye bitüm FT-IR deney sonucu

Bitümdeki önemli fonksiyonel grupları belirlemek için 400 ila 4000 cm^{-1} dalga boylarını kapsayan spektrumlar kaydedilmiştir. Örneğin, yaklaşık 1030 cm^{-1} 'deki zirveler sülfoksitleri (Lu vd., 2011), 1600 cm^{-1} ve 1700 cm^{-1} deki zirveler aromatikliğin varlığını ve karbonil bileşiklerini ($\text{C}=\text{O}$), 2900 cm^{-1} ve 2850 cm^{-1} civarındaki zirveler C-H alkan zincirlerini (D'Angelo vd., 2022), 3421 cm^{-1} civarındaki zirveler ise hidroksil grubu ($-\text{OH}$) (Wang, Qi, vd., 2020) temsil etmektedir.

Deney 4, Deney 6 ve Deney 13 'de 1031 cm^{-1} civarındaki sülfoksit grubunu (S - O) gösteren zirveler görülmektedir. Bu kimyasal bağ, yaşlanma sırasında kükürt elementleri tarafından oksijenin emilmesiyle üretilir (Qian vd., 2022). Ayrıca yüksek sıcaklıklarda, asfaltın doymamış kimyasal bağları koparak serbest radikalleri oluşturur. Bu radikaller oksijenle birleşerek karbonil ve sülfoksit gruplarını oluştururlar (Apeagyei, 2011). Saf bitüm ve Deney 16'da bu zirveler görülmemektedir. Bu duruma; Deney 4 'de yüksek karıştırma sıcaklığının (190°C) ve yüksek karıştırma hızının (4000 rpm), Deney 6'da yüksek karıştırma hızının (4000 rpm), Deney 13'te ise yüksek karıştırma sıcaklığının (190°C) neden olduğu düşünülmektedir. Deney 16'da yüksek karıştırma sıcaklığına (190°C) rağmen %1,00 oranında GNP kullanılmasının bu zirvelerin oluşmasını engellediği düşünülmektedir.

Saf bitüm, Deney 4, Deney 6 ve Deney 13'te 1600 cm^{-1} civarında C-C alkinleri gösteren birbirine yakın zirveler görülmektedir. C - C içeriğindeki büyük değişiklikler, polimer zincirinin bozulmasını, dolayısıyla asfaltın mekanik dayanımının azalmasını göstermektedir (Wu vd., 2022).

Deney 13'de (%0,7 GNP) 3185 cm^{-1} civarındaki zirveler hidroksil grupların ($\text{O}-\text{H}$) oluşumunu göstermektedir (Werkovits vd., 2023). Çift bağların bazı kısımlarının oksidasyonu nedeniyle bu hidroksil grupları meydana gelebilir (Wang, Zhang, vd., 2020). Deney 16'da (%1,0 GNP katkısı) aynı karıştırma sıcaklığına rağmen kısa karıştırma süresi nedeniyle hidroksil grupların oluşmadığı söylenebilir.

5.12. Çoklu Yanıt Performans İndeksi (MRPI) ile Optimizasyon

Taguchi metodunda sadece bir tane bağımlı değişken (tepki) ele alınmıştır ve S/N performans istatistiklerine göre yapılan değerlendirmeler ile RTFOT öncesi penetrasyon,

RTFOT sonrası penetrasyon, RTFOT öncesi yumuşama noktası, RTFOT sonrası yumuşama noktası, parlama noktası, RTFOT kütle kaybı, elastik geri dönme ve Marshall stabilitesinin en uygun seviyelerini belirlenmiştir.

Fakat uygulamada, bu çalışmadaki gibi, daha fazla bağımlı değişken vardır. Literatürde Taguchi yöntemi tek bir yanıt senaryosu odaklı olmuştur. Çok yanıtlı olan problemlerin optimizasyonu için Taguchi metodu doğruca kullanılmamıştır. Fakat Taguchi metodu tasarımının kullanılması ile her yanıt için elde edilen veri, farklı araştırmacıların geliştirdiği farklı yaklaşımlarla analiz edilebilmektedir (Çolak vd., 2023). Jeyapaul vd. (2005) Taguchi metodunda çok yanıtlı problem çözümlerine ilişkin literatür taraması sunmuştur.

Bu tez çalışmasında, çoklu yanıtların tekli yanıtlara dönüştürülmesi için Ağırlıkların Atanması Yöntemi kullanılmıştır (Krishnaiah ve Shahabudeen, 2012). En büyük - en iyi performans istatistiği kullanılması sonucu elde edilmiş Taguchi Metodu sonuçlarına göre, her deney çeşidi için elde edilmiş S/N değerleri yani bağımsız yanıtlar (RTFOT öncesinde ve sonrasında uygulanan penetrasyon deneyi, elastik geri dönme deneyi, Marshall tasarım deneyi), toplam S/N değerlerine bölünmüştür. En küçük - en iyi performans istatistiği kullanılması sonucu hesaplanmış S/N değerleri için ise (RTFOT öncesinde ve sonrasında uygulanan yumuşama noktası deneyi, RTFOT kütle kaybı deneyi) ters normalizasyon prosedürü kullanılmıştır.

MRPI ağırlıklı bir skordur, bu nedenle optimal seviyeler maksimum MRPI değerlerine göre belirlenmiştir. Ağırlık Atanması Yöntemi kullanılarak S/N değerleri ile hesaplanan ağırlıklar ve çoklu yanıt performans indeksleri (MRPI) Tablo 5.37’de verilmiştir.

Tablo 5.37. MRPI değerleri ve S/N değerleri

Deney No	Penetrasyon (RTFOT Öncesi)		Penetrasyon (RTFOT Sonrası)		Yumuşama Noktası (RTFOT Öncesi)		Yumuşama Noktası (RTFOT Sonrası)		RTFOT Kütle Kaybı		Elastik Geri Dönme		Marshall Stabilité		MRPI
	S/N	Ağırlık	S/N	Ağırlık	S/N	Ağırlık	S/N	Ağırlık	S/N	Ağırlık	S/N	Ağırlık	S/N	Ağırlık	
1	39,10	0,064	35,05	0,064	-33,26	0,063	-34,35	0,063	-20,24	0,040	12,04	0,039	59,81	0,063	3,905
2	38,81	0,063	34,38	0,063	-33,53	0,063	-34,65	0,063	-29,22	0,028	16,90	0,054	59,23	0,063	4,160
3	37,57	0,061	33,55	0,061	-34,15	0,062	-34,98	0,062	-28,72	0,028	16,26	0,052	57,49	0,061	3,618
4	34,42	0,056	32,07	0,059	-35,34	0,060	-35,98	0,060	-15,19	0,054	20,00	0,064	60,79	0,064	3,916
5	39,39	0,064	35,11	0,064	-33,16	0,063	-34,49	0,063	-35,14	0,023	19,55	0,063	59,26	0,063	4,639
6	38,31	0,063	33,70	0,062	-33,78	0,062	-35,00	0,062	-28,66	0,028	20,00	0,064	60,98	0,064	4,600
7	37,79	0,062	33,45	0,061	-33,58	0,063	-34,94	0,062	-17,97	0,045	20,83	0,067	57,10	0,060	4,128
8	37,30	0,061	33,34	0,061	-33,88	0,062	-35,01	0,062	-9,27	0,088	21,21	0,068	61,19	0,065	4,618
9	38,80	0,063	34,84	0,064	-33,62	0,063	-34,81	0,062	-29,68	0,027	20,83	0,067	60,52	0,064	4,853
10	39,08	0,064	34,51	0,063	-33,26	0,063	-34,65	0,063	-25,43	0,032	22,61	0,072	60,44	0,064	5,085
11	39,95	0,065	34,53	0,063	-33,40	0,063	-34,40	0,063	-18,98	0,043	21,58	0,069	59,94	0,063	4,992
12	39,43	0,064	35,06	0,064	-33,64	0,063	-34,63	0,063	-15,59	0,052	20,83	0,067	58,61	0,062	4,721
13	38,02	0,062	34,58	0,063	-33,16	0,063	-34,40	0,063	-6,08	0,134	20,83	0,067	58,86	0,062	4,513
14	38,85	0,064	34,66	0,063	-32,87	0,064	-34,32	0,063	-9,49	0,086	17,50	0,056	56,97	0,060	3,988
15	36,98	0,060	33,53	0,061	-34,09	0,062	-35,06	0,062	-29,87	0,027	21,21	0,068	55,01	0,058	3,843
16	37,65	0,062	33,81	0,062	-33,85	0,062	-34,96	0,062	-3,07	0,265	20,42	0,065	59,74	0,063	4,428

MRPI ortalama S/N etkileri Tablo 5.38’te verilmiştir.

Tablo 5.38. MRPI ortalama S/N etkileri

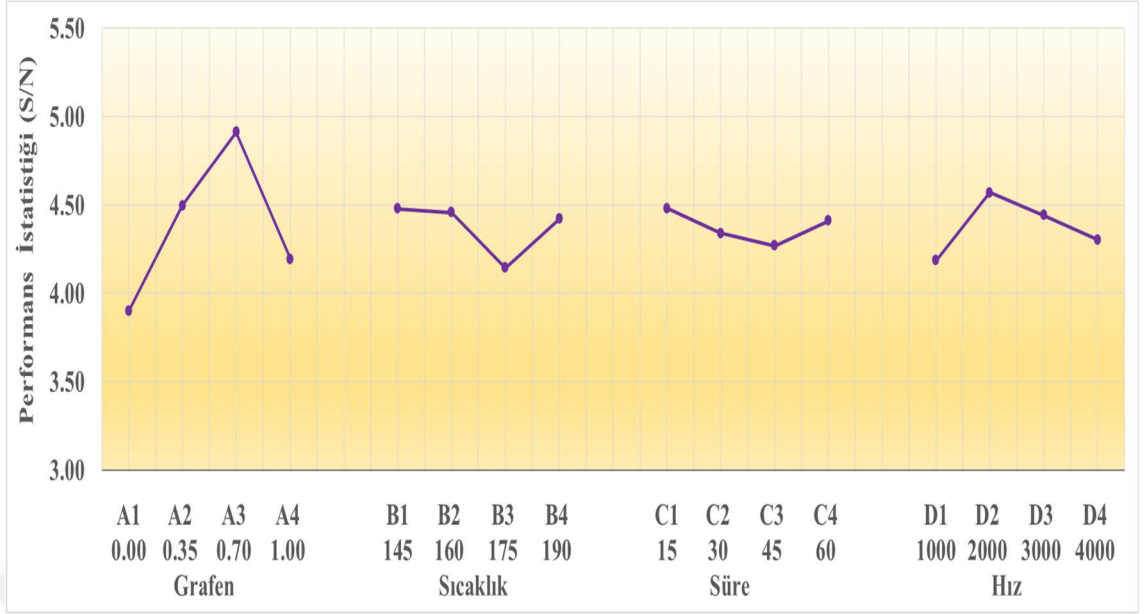
Ortalama S/N Etkileri				
	GNP	Sıcaklık	Süre	Hız
1. Seviye	3,90	4,48	4,48	4,19
2. Seviye	4,50	4,46	4,34	4,57
3. Seviye	4,91	4,15	4,27	4,44
4. Seviye	4,19	4,42	4,41	4,30

Yapılan bütün deneylerden elden edilen yanıtların tek bir yanıtla dönüştürülmesi ile elde edilen MRPI sonuçları için optimum seviyeler Tablo 5.39’da belirtildiği gibi A3, B1, C1 ve D2 olacak şekilde belirlenmiştir. Çoklu yanıt performans indislerine en yüksek oranda etki eden parametreler sırasıyla GNP oranı, karıştırma hızı, karıştırma süresi ve karıştırma sıcaklığı olmuştur.

Tablo 5.39. MRPI performans tahminleri

Faktörler	Seviye	S/N’ e olan katkıları
GNP	A3	0,537
Sıcaklık	B1	0,102
Süre	C1	0,106
Hız	D2	0,195
Tüm Faktörlerin Katkısı (S/N)		0,941
Ortalama Performans İstatistiği (S/N)		4,375

Şekil 5.19’da görüldüğü gibi GNP katkı maddesinin üçüncü seviyesine (%0,70 oran) kadar MRPI değeri artmış, dördüncü seviyede (%1,0 oran) ise azalmıştır. Karıştırma sıcaklığının birinci seviyesi (145 °C) ve ikinci seviyesinde (160 °C) MRPI değeri birbirine yakın bulunurken üçüncü seviyesinde (175 °C) azalmış, dördüncü seviyesinde (190 °C) ise artmıştır. Karıştırma süresinin üçüncü seviyesine (45 dk) kadar MRPI değeri azalırken dördüncü seviyesinde (60 dk) bir miktar artmıştır. Karıştırma hızının ikinci seviyesine (2000 rpm hıza) kadar MRPI değeri artmış, sonraki seviyeler için azalmıştır.



Şekil 5.19. MRPI performans istatistikleri

MRPI optimum seviyeleri için yapılan doğrulama deney sonuçları ve performans istatistikleri Tablo 5.40'ta verilmiştir. MRPI için yapılan doğrulama deney sonuçları %95 güven aralığında hesaplanan sınırlar içerisinde bulunmuştur.

Tablo 5.40. MRPI performans istatistikleri ve doğrulama deney sonuçları

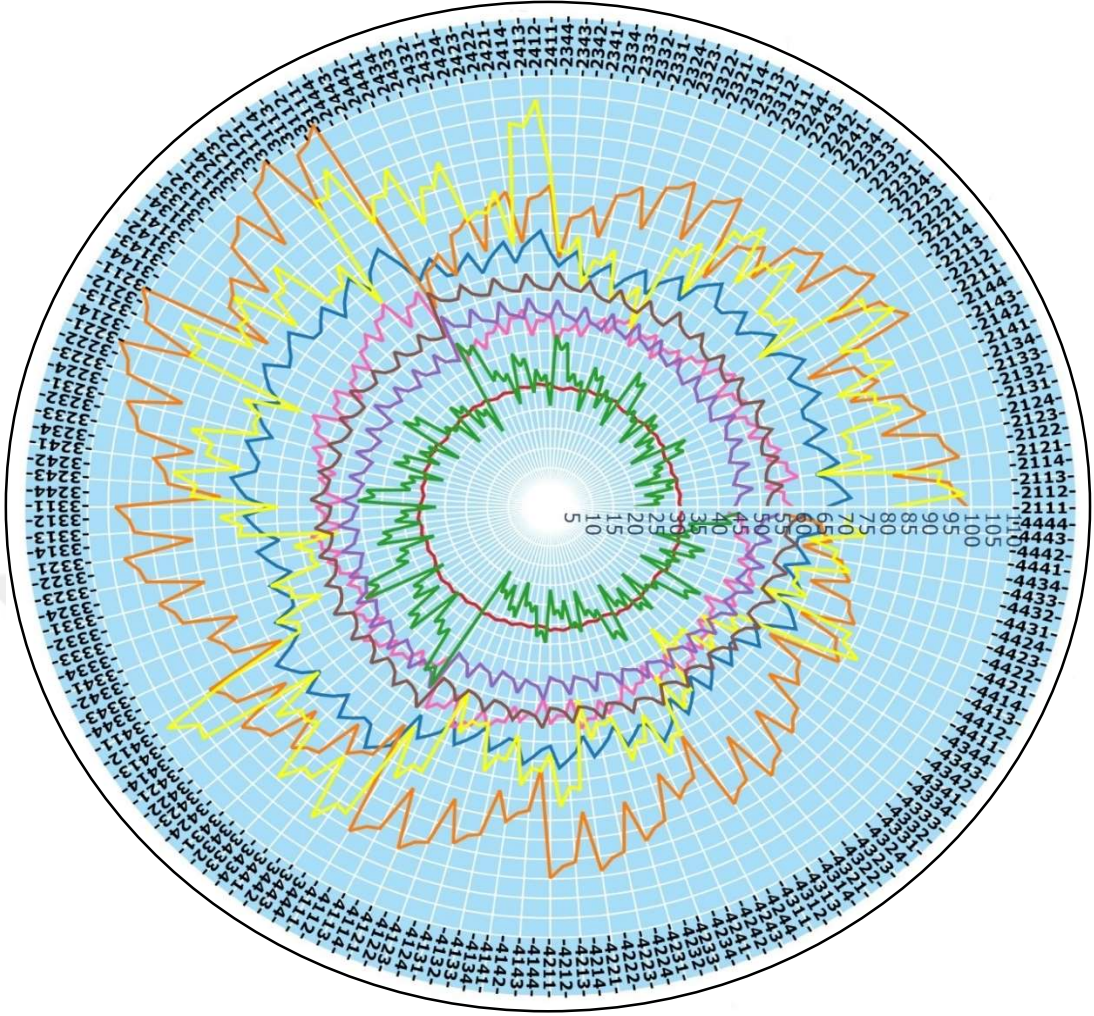
	Penetrasyon (RTFOT Öncesi)		Penetrasyon (RTFOT Sonrası)		Yumuşama Noktası (RTFOT Öncesi)		Yumuşama Noktası (RTFOT Sonrası)		Marshall Stabilite	
MRPI Optimum Şartlarında Beklenen Değer	40,769	S/N	35,704	S/N	-32,867	S/N	-34,063	S/N	62,053	S/N
	109,259	0,1 mm	60,984	0,1 mm	43,987	°C	50,481	°C	1266,628	kg
Doğrulama Deney Sonucu	40,231	S/N	35,519	S/N	-33,026	S/N	-34,168	S/N	61,619	S/N
	102,700	0,1 mm	59,700	0,1 mm	44,800	°C	51,100	°C	1204,910	kg
S/N Güven Aralığı ($\alpha=95\%$)	40,182	41,356	35,053	36,053	-33,062	-32,671	-34,284	-33,841	61,430	62,676

Tablo 4.6’da verilen deney planındaki 16 farklı karışıma ayrı ayrı RTFOT öncesi penetrasyon, RTFOT sonrası penetrasyon, RTFOT öncesi yumuşama, RTFOT sonrası yumuşama, parlama noktası, elastik geri dönme, Marshall stabilitesi olacak şekilde 8 deney yapılmış ve bu deney sonuçlarına göre Taguchi yöntemi ile 256 karışımın tüm deney tahminleri yapılmıştır.

%95 güven aralığında toplamda $256 \times 8 = 2048$ tahmin yapılmış olup dağılım grafiği Şekil 5.20’de gösterilmiştir. Radar grafiği kullanılarak Taguchi metodu ile hazırlanan deney planında olan ve olmayan tüm deney türleri için istenilen parametre ve seviyelerde sonucun ne olacağı önceden görülebilmektedir.

Radar grafiğinin etrafındaki rakamlar, deney parametrelerinin seviyelerini göstermektedir. Birinci rakamlar GNP parametresini, ikinci rakamlar sıcaklık parametresini, üçüncü rakamlar süre parametresini ve dördüncü rakamlar hız parametresini temsil etmektedir. Örneğin 2324’te; birinci rakam GNP parametresinin 2.seviyesi olan 0,35 GNP oranını, ikinci rakam sıcaklık parametresinin 3.seviyesi olan 175°C sıcaklığı, üçüncü rakam süre parametresinin 2.seviyesi olan 30 dakikayı, dördüncü rakam hız parametresinin 4.seviyesi olan 4000 rpm hızı göstermektedir.

Tahminlerin aynı grafikte görüntülenmesi için parlama noktası birimi 10’a bölünmüş, MRPI 17 ile çarpılmış, elastik geri dönme 3 ile çarpılmış ve stabilite birimi kN’nin 7 katı olarak temsil edilmiştir. Örneğin; 4231 karışımının, parlama deney sonucu 310°C tahmin edilmiştir, radar grafiğinde parlama noktası deneyini temsil eden kırmızı renkli çizgi 4231 deney hızasında takip edilip bakıldığında $310/10=31$ olarak gözükmektedir.



Şekil 5.20. %95 güven aralığında yapılmış tahmin dağılım grafiği

Radar grafiğindeki her bir renk bir deney çeşidini temsil etmektedir.

- MRPI
- RTFOT öncesi penetrasyon
- RTFOT sonrası penetrasyon
- Parlama noktası
- Marshall stabilitesi
- RTFOT öncesi yumuşama noktası
- RTFOT sonrası yumuşama noktası
- Elastik geri dönme

Radar grafiği incelendiğinde, MRPI yöntemi ile belirlenen %0,70 GNP oranı, 145°C karıştırma sıcaklığı, 15 dakika karıştırma süresi ve 2000 rpm karıştırma hızı olan optimum seviyeler 3112 ile gösterilmiştir.

Radar grafiği verileri sayesinde; iklim, trafik ve evre şartlarına göre hangi karışımın kullanılacağı öngörülebilir. Tüm parametreler ve deneyler değerlendirildiğinde 3112 tahmini optimum seçilmiştir ancak karışımın kullanılacağı şartlara göre belirlenebilecek deney kombinasyonlarını da radar grafiğinden yorumlamak mümkündür.

Ayrıca radar grafiği verileri ile deneylerin kombinasyonlarını ayrı ayrı değerlendirmekte mümkündür. Örneğin; soğuk iklimlerde asfaltın esnek kalabilmesi için daha yüksek penetrasyonlu (yumuşak) bitüm tercih edilerek asfaltın düşük sıcaklıklarda kırılgan olması ve atlamaşı engellenmek istenir. Sıcak iklimlerde ise asfaltın yüksek sıcaklıklarda deformasyona uğramaması için daha düşük penetrasyonlu (sert) bitüm tercih edilerek asfaltın sıcak havalarda yumuşamasını ve tekerlek izlerinin oluşması engellenmek istenir. Fakat penetrasyonu şartlara uygun seçmeye çalışırken diğer özellikler göz ardı edilebiliyor. Bu yüzden grafikteki verilere göre penetrasyonu, iklim şartına uygun seçerken aynı zamanda diğer deney özeliklerinden örneğin stabiliteyi de maksimum yapabilmek için hangi seviyelerin seçilmesi gerektiği radar grafiğindeki veriler sayesinde seçilebilmektedir.

6. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında, modifiye edilmiş bitümlü karışımlarda kullanılabilecek optimum Grafen Nanoplatelet (GNP) katkı miktarını belirleyebilmek için Taguchi Optimizasyonu kullanılmıştır. Taguchi Optimizasyonu kullanılarak GNP katkı oranı, karıştırma sıcaklığı, karıştırma süresi ve karıştırma hızı parametrelerinin optimum kombinasyonu tespit edilmiştir. Taguchi metoduna göre en büyük - en iyi, en küçük - en iyi ve nominal - en iyi olacak şekilde üç adet performans istatistiği mevcuttur. Çalışmanın durumu göz önünde bulundurularak biri kullanılabilmektedir. Bu tez çalışmasında en büyük - en iyi performans istatistiğinin kullanımı ile bitümün penetrasyonunu, parlama noktasını, elastik geri dönmesini, Marshall stabilitesini değerlendirmek için deney sonuçlarının en iyisini değerlerin en büyüğünün verdiği ve en küçük - en iyi performans istatistiğinin kullanımı ile bitümün yumuşama noktasını, RTFOT kütle kaybını değerlendirmek için deney sonuçlarının en iyisini değerlerin en küçüğünün verdiği şekilde kullanılmıştır.

Deney tasarımının tam faktöriyelinde, parametrelerden seçilenler değişiklik gösterirken kalan parametreler sabittir. Bu tez çalışmasında Taguchi metodu uygulanmasaydı yapılan her deney çeşidi için ayrı ayrı olacak şekilde 256 adet deneyin yapılması gerekecekti. Fakat bu metot sayesinde her deney türü için ayrı ayrı olacak şekilde 16 tane deney yapılmıştır. Toplamda $8 \times 16 = 128$ deney yapılarak parametrelerin optimum seviyeleri belirlenmiştir.

RTFOT öncesi penetrasyonda değerlerin maksimumu olan optimum seviyeler A3, B1, C1 ve D1 olmuştur. Penetrasyonda en etkili olan parametrelerin sıralaması GNP katkısının oranı, sıcaklık, hız ve süredir. Penetrasyonun değeri GNP'nin %0,70 oranına kadar artmışken %1,00 oranında azalmıştır. Karıştırma sıcaklığı, karıştırma süresi ve karıştırma hızı arttıkça penetrasyon değerinde azalış meydana gelmiştir. RTFOT öncesinde saf bitüme yapılan penetrasyonun sonucu 82,50 (0,1mm)' dir. Karışımlara yapılan penetrasyonun sonucu ise 52,60 ile 99,40 (0,1mm) aralığında değişmiştir.

RTFOT sonrasındaki penetrasyonda değerlerin maksimumu olan optimum seviyeler A3, B1, C2, D1 olmuştur. RTFOT sonrası penetrasyonda en etkili olan parametrelerin sıralaması sıcaklık, GNP katkısının oranı, hız ve süredir. Penetrasyonun değeri GNP'nin %0,70 oranına kadar artmışken, %1.00 oranında biraz azalmıştır. Sıcaklığının artması ile

penetrasyonda artma görülmüştür. Karıştırma süresi 30 dakika olan ikinci seviyede artışa, diğer seviyelerde azalışa neden olmuştur. Karıştırma hızı arttıkça penetrasyon değerinde azalma görülmüştür, ancak 2000 ve 3000 rpm hızlarda azalış yaklaşık aynı olmuştur. RTFOT sonrasında saf bitüme yapılan penetrasyonun sonucu 50,17 (0,1mm)'dir. Karışımlara yapılan penetrasyonun sonucu ise 40,13 ile 56,97 (0,1mm) aralığında değişmiştir.

Penetrasyon deneyi, bitümün deney sıcaklığı için kıvamının ölçütüdür. Penetrasyonu yüksek olan bitümler daha akışkan yani yumuşaktır, penetrasyonu düşük olan bitümler daha sert yani daha viskozdur (Błażejowski vd., 2021). Genelde soğuk bölgelerde kaplamanın çatlak oluşumu potansiyeline karşı dirençli olabilmesi için penetrasyonu yüksek bitüm kullanılır. Sıcak bölgelerde ise kaplamada oluşabilecek tekerlek izi bozulmalarına karşı dirençli olabilmesi için penetrasyonu düşük bitüm kullanılır (Mirza vd., 2011).

RTFOT öncesi yumuşama noktası deneyinin sonucunu minimum yapan optimum seviyeler A3, B1, C1 ve D1 olmuştur. Yumuşama noktasında en etkili olan parametrelerin sıralaması sıcaklık, hız, GNP katkısının oranı ve süredir. Yumuşama noktası değeri GNP'nin %0,70 oranına kadar azalmışken, %1,00 oranında ise yaklaşık aynı kalmıştır. Karıştırma sıcaklığı, karıştırma süresi ve karıştırma hızlarındaki artış yumuşama noktası üzerinde de artışa neden olmuştur. Karıştırma süresinin etkisinin ise en az olduğu görülmüştür. RTFOT öncesi saf bitüme yapılan yumuşama noktasının sonucu 45,00 °C'dir. Karışımlara yapılan yumuşama noktasının sonucu ise 44,00 ile 58,45 °C aralığında değişmiştir.

RTFOT sonrası yumuşama noktası deneyinin sonucunu minimize eden optimum seviyeler A3, B1, C1, D1 olmuştur. RTFOT sonrası yumuşama noktasında en etkili olan parametrelerin sıralaması sıcaklık, hız, GNP katkısının oranı ve süredir. Yumuşama noktası değeri GNP'nin %0,70 oranına kadar azalmışken, %1,00 oranında ise biraz artmıştır. Sıcaklık, süre ve hızdaki artış yumuşama noktası üzerinde de artışa neden olmuştur. Karıştırma süresinin yumuşama noktası üzerindeki etkisi en az olmuştur. RTFOT sonrası saf bitüme yapılan yumuşama noktasının sonucu 52,00 °C'dir. Karışımlara yapılan yumuşama noktasının sonucu ise 52,00 ile 62,95 °C aralığında değişmiştir.

Parlama noktası deneyi sonucunun maksimumu olan optimum seviyeler A4, B4, C1 ve D4 olmuştur. Parlama noktasında en etkili olan parametrelerin sıralaması GNP katkısının oranı, süre, sıcaklık ve hızdır. Parlama noktası sonuçları, GNP katkı maddesi ile karıştırma sıcaklığının tüm seviyelerinde artmıştır. Karıştırma hızının ikinci seviyesinde azalmış, üçüncü ve dördüncü seviyelerinde ise parlama noktası değerleri artmış. Karıştırma süresinin artması ise parlama noktası değerinde azalışa neden olmuştur. Saf bitümün parlama noktası değeri 304 °C olarak bulunmuştur. Yapılan deneylerde parlama noktası değeri 301 ile 318 °C aralığında değişmiştir. TS EN ISO 2592’de istenen minimum 230°C sıcaklığın üstünde parlama noktalarının elde edilmesi nedeniyle GNP katkı maddesi ile bitümün modifiye edilmesinde iş güvenliği açısından bir sakınca görülmemiştir.

Elastik geri dönme deneyi sonucunun maksimumu olan optimum seviyeler A3, B4, C4 ve D4 olmuştur. Elastik geri dönme yüzdesi değerinde en etkili olan parametrelerin sıralaması GNP katkısının oranı, süre, sıcaklık ve hızdır. Elastik geri dönme sonuçları GNP’nin %0,70 olan üçüncü seviyesine kadar artmış, %1,00 olan dördüncü seviyesinde biraz azalmıştır. Sıcaklık artışı ile elastik geri dönme deneyi sonuçlarında artma olmuştur. Elastik geri dönme değeri üzerinde en fazla artışa neden olan karıştırma süresi dördüncü seviye olan 60 dakika olmuştur. Karıştırma hızı 2000 rpm’de artışa neden olurken 3000 ve 4000 rpm hızlarda çok etkili olmamıştır. Saf bitüme yapılan elastik geri dönme deneyi sonucu %9,00’dır. Karışımlara yapılan elastik geri dönme deneyi sonucu ise %4,00 ile 13,50 aralığında değişmiştir.

GNP, saf bitümün sıcaklığa karşı hassasiyetini azaltmış, elastik geri dönme kabiliyetini ise artırmıştır. Dolayısıyla modifiye edilmiş karışımlar, yüksek sıcaklıklarda kalıcı deformasyonun yanı sıra düşük sıcaklıklardaki çatlama ve kırılmaya karşı daha dirençli hale gelmiştir.

RTFOT kütle kaybı deneyi sonucunun minimumu olan optimum seviyeler A4, B4, C4 ve D1 olmuştur. RTFOT kütle kaybında en etkili olan parametrelerin sıralaması sıcaklık, GNP katkısının oranı, hız ve süredir. Kütle kaybı değeri GNP oranı artması sonucu azalırken, en fazla azalma %1,00 olan dördüncü seviyede görülmüştür. Süre ve hızın etkisi çok azdır. Saf bitüme yapılan kütle kaybı değeri %0,58’dir. Karışımlara yapılan kütle kaybı deneyinin sonucu ise %0,01 ile 0,57 aralığında değişmiştir.

Marshall stabilite deneyi sonucunun maksimumu olan optimum seviyeler A3, B4, C1 ve D2 olmuştur. Marshall stabilitesinde en etkili olan parametrelerin sıralaması süre, sıcaklık, GNP katkısının oranı ve hızdır. Stabilite değeri için GNP'nin %0,70 olan üçüncü seviyesine kadar artış görülürken, %1,00 olan dördüncü seviyesinde ise birinci seviyeden daha çok azalış görülmüştür. Karıştırma sıcaklığının ikinci ve üçüncü seviyeleri olan 160°C ve 175 °C sıcaklıklarda stabilite değerinde azalış görülürken, 190 °C olan dördüncü seviyede, birinci seviye olan 145 °C sıcaklıktan daha yüksek stabilite değeri görülmüştür. Karıştırma süresinin ikinci seviyesi olan 30 dakikada stabilite değeri azalmış, üçüncü ve dördüncü seviyeler olan 45 ve 60 dakikalık sürelerde artmıştır. Karıştırma hızının ikinci seviyesi olan 2000 rpm stabilite değerini artırırken üçüncü ve dördüncü seviyeler ise birbirlerine yakın bir oranda azaltmıştır. Optimum bitüm oranıyla yapılan saf bitüm stabilite sonucu 1098,6 kg'dır. Karışımlara yapılan Marshall stabilite deney sonucu ise 562,82 ile 1147,00 kg aralığında değişmiştir.

BSK kontrol numuneleri için sıkıştırma sıcaklığı 160°C olarak alınmıştır. Katkı maddesi oranının artması ile akma değeri azalmış, Marshall katsayısı (MQ) oranı ise artmıştır. Bu durum modifiye edilmiş karışımların, tekerlek izine ve çeşitli deformasyonlara karşı daha dirençli hale geldiklerini göstermiştir.

FT-IR sonuçlarına göre; Deney 4 (A1, B4, C4, D4), Deney 6 (A1, B2, C1, D4) ve Deney 13 'de (A3,B4,C2, D2) 1031 cm⁻¹ civarındaki, yaşlanma sırasında kükürt elementleri tarafından oksijenin emilmesiyle üretilen sülfoksit grubunu (S - O) gösteren zirveler görülmüştür. Deney 6'da 4000 rpm hızın, Deney 13'te ise 190°C sıcaklığın neden olduğu düşünülmektedir. Deney 16'da (A4, B4, C1, D3) 190°C yüksek sıcaklığa rağmen %1,00 oranında GNP kullanılmasının bu zirvelerin oluşmasını engellediği düşünülmektedir. Saf bitüm, Deney 4, Deney 6 ve Deney 13'te 1600 cm⁻¹ civarında C-C alkinleri gösteren birbirine yakın zirveler görülmüştür. C - C içeriğindeki büyük değişiklikler, polimer zincirinin bozulmasını, dolayısıyla asfaltın mekanik dayanımının azalmasını göstermektedir (Wu vd., 2022). Deney 13'de (%0,7 GNP) 3185 cm⁻¹ civarındaki zirveler hidroksil grupların (O-H) oluşumunu göstermektedir (Werkovits vd., 2023). Deney 16'da (%1,0 GNP katkısı) aynı karıştırma sıcaklığına rağmen kısa karıştırma süresi nedeniyle hidroksil grupların oluşmadığı söylenebilir.

Çalışmada kullanılan 70/100 penetrasyonlu bitüm ile seçilen parametre ve seviyelerde hesaplanan MRPI sonuçlarına göre optimum seviyeler %0,70 GNP oranı, 145°C sıcaklık, 15 dakika süre ve 2000 rpm hız olarak tespit edilmiştir. GNP, optimum karıştırma sıcaklığını 145°C'ye düşürerek enerji tasarrufu ve çevresel avantajlar sağlamıştır. Ayrıca bitümün düşük sıcaklıkta karıştırılması bitümün daha az yaşlanarak daha yüksek performans göstermesini sağlayacaktır.



KAYNAKLAR

- Abut, Y. (2019) "Yansıma çatlağı oluşumu açısından kompozit bir üstyapının performansının belirlenmesi", **1. Ulusal Beton Yollar Kongresi ve Sergisi**, KGM Halil Rıfat Paşa Konferans Salonu, Ankara, 80-89.
- Adlı, E. (2019) "Grafen ve özellikleri", Yüksek Lisans Tezi, **Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Balıkesir.
- Adnan, A. M., Luo, X., Lü, C., Wang, J. and Huang, Z. (2020) "Improving mechanics behavior of hot mix asphalt using graphene-oxide", **Construction and Building Materials**, 254, 119261.
- Adnan, A. M., Luo, X., Lü, C., Wang, J. and Huang, Z. (2022) "Physical properties of graphene-oxide modified asphalt and performance analysis of its mixtures using response surface methodology", **International Journal of Pavement Engineering**, 23(5), 1378-1392.
- Adnan, A. M., Lü, C., Luo, X. and Wang, J. (2021) "Impact of graphene oxide on zero shear viscosity, fatigue life and low-temperature properties of asphalt binder", **Materials**, 14(11), 3073.
- Al Hawesah, H., Sadique, M., Harris, C., Al Nageim, H., Stopp, K., Pearl, H. and Shubbar, A. (2021) "A review on improving asphalt pavement service life using gilsonite-modified bitumen", **Sustainability**, 13(12), 6634.
- Aman, A., Bhardwaj, R., Gahlot, P. and Phanden, R. K. (2023) "Selection of cutting tool for desired surface finish in milling Machine using Taguchi optimization methodology", **Materials Today: Proceedings**, 78, 444-448.
- An, X., Wang, R., Kang, X. and Yue, J. (2023) "A more accurate fatigue characterization of GO-modified asphalt binder considering non-linear viscoelastic behaviour and UV exposure effects", **International Journal of Fatigue**, 168, 107396.
- Apeagyei, A. K. (2011) "Laboratory evaluation of antioxidants for asphalt binders", **Construction Building Materials**, 25(1), 47-53.
- Aravind, S., Isac, A. J. and Aparajith, S. (2018) "Construction of porous asphalt pavement using graphene", **Int. J. Recent Trends Eng. Res.**, 4, 475-481.
- Araz, N. G., Aksoy, A., Aslan, M. T. and İskender, E. (2023) "Asfalt kaplamalarda bitüm oranına bağlı olarak sıkıştırma sıcaklığının etkisinin Marshall deneyi parametreleri ile incelenmesi", **Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi**, 4(1), 39-50.
- ASMÜD. "İlık Karışım Asfalt", http://www.asnud.org.tr/Asfalt_Ilik_Karisim.asp Son erişim tarihi: 01.06.2024.

- Atıcı, İ. (2022) "Modifiye bitüm ve metal atığı içeren bitümlü sıcak karışımların kar/buzla mücadele etmesinin ve kendini iyileştirme özelliklerinin araştırılması", Yüksek Lisans Tezi, **Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Elazığ.
- Balta, İ. (2004) "Bitümlü sıcak karışımların sudan kaynaklanan bozulmalara karşı duyarlılığı", Yüksek Lisans Tezi, **Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, İzmir.
- Baş, F. İ., Bayrak, O. Ü. and Bayata, H. F. (2022) "A practical design guide for unbonded jointed plain concrete roads over deteriorated HMA roads: Realistic traffic loading", **Coatings**, 12(12), 1817.
- Başkan, F. (2020) "Grafitin bitümlü sıcak karışımdaki etkisi", Yüksek Lisans Tezi, **İstanbul Gelişim Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul.
- Baykara, A. (2021) "Bitüm modifikasyonunda farklı kaynaklardan temin edilen bağlayıcı kullanımının bitümlü sıcak karışımların mekanik özelliklerine etkisi", Yüksek Lisans Tezi, **Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Elazığ.
- Bayrak, O. Ü. (2007) "Rijit üstyapı tasarımına yeni bir yaklaşım", Doktora Tezi, **Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Erzurum.
- Bell, C. A., Sosnovske, D. and Wieder, J. (1994) "Aging: binder validation", **Strategic Highway Research Program**, National Research Council, **Washington DC**.
- Błażejowski, K., Wójcik-Wisniewska, M., Baranowska, W. and Ostrowski, P. (2021) Bitumen handbook, **Orlen Asphalt**, Poland.
- Brcic, H. (2016) "Investigation of the rheological properties of asphalt binder containing graphene nanoplatelets", Master Thesis, **Norwegian University of Science and Technology**, Norway.
- Brown, E. R., Kandhal, P. S. and Zhang, J. (2001) "Performance testing for hot mix asphalt", **National Center for Asphalt Technology**, Auburn University, **Alabama**.
- Chen, Y., Wang, Q., Li, Z. and Ding, S. (2020) "Rheological properties of graphene nanoplatelets/rubber powder composite modified asphalt", **Construction and Building Materials**, 261, 120505.
- Cheng, Y., Han, H., Fang, C., Li, H., Huang, Z. and Su, J. (2020) "Preparation and properties of nano-CaCO₃/waste polyethylene/styrene-butadiene-styrene block polymer-modified asphalt", **Polymer Composites**, 41(2), 614-623.
- Cüre, S. (2005) "Otoyol esnek üstyapı inşaatında kalite kontrolleri ve kalite yönetim sisteminin uygulanabilirliği", Yüksek Lisans Tezi, **Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Balıkesir.

- Çetin, S. (2007) "Afyonkarahisar bölgesi volkanik kayaların sıcak karışım asfalt kaplamalarında agrega olarak kullanılabilirliğinin araştırılması", Yüksek Lisans Tezi, **Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Afyon.
- Çiftçi, C., Eymirli, E. B. and Çakal, M. A. (2016) "Tra1 bölgesi linyit ve oltu taşı madenlerinin grafen hammaddesi olarak kullanımına yönelik analiz çalışması", **Kuzeydoğu Anadolu Kalkınma Ajansı, Erzurum**.
- Çolak, M. A., Zorlu, E., Çodur, M. Y., Baş, F. İ., Yalçın, Ö. and Kuşkapan, E. (2023) "Investigation of physical and chemical properties of bitumen modified with waste vegetable oil and waste agricultural ash for use in flexible pavements", **Coatings**, 13(11), 1866.
- D'Angelo, S., Ferrotti, G., Cardone, F. and Canestrari, F. (2022) "Asphalt binder modification with plastomeric compounds containing recycled plastics and graphene", **Materials**, 15(2), 516.
- Dey, N., Vickram, S., Thanigaivel, S., Kamatchi, C., Subbaiya, R., Karmegam, N. and Govarthan, M. (2022) "Graphene materials: armor against nosocomial infections and biofilm formation—a review", **Environmental Research**, 214, 113867.
- Firoozifar, S. H., Foroutan, S. and Foroutan, S. (2011) "The effect of asphaltene on thermal properties of bitumen", **Chemical Engineering Research and Design**, 89(10), 2044-2048.
- Geçkil, T. (2019) "Physical, chemical, microstructural and rheological properties of reactive terpolymer-modified bitumen", **Materials**, 12(6), 921.
- Geçkil, T., Aksağan, Z. and İnce, C. B. (2021) "Asfalt kaplamaların nem performansı üzerinde siyah karbonun etkisi", **Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Politeknik Dergisi**, 9(5), 2102-2115.
- Geçkil, T., Önal, Y. and İnce, C. B. (2021) "Atık PET ile modifiye edilmiş bitümlü sıcak karışımların nem direnci", **Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Politeknik Dergisi**, 24(2), 461-471.
- Gençtürk, G. (2011) "Sönmüş kireç ile çimento ve Pr Plast kullanımının asfalt kaplamaların mekanik özellikleri üzerindeki etkileri", Yüksek Lisans Tezi, **Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Trabzon.
- Ghalandari Shamami, K., Effati, M. and Mirabdolazimi, S. M. (2023) "Evaluation of the effects of Graphene-Nanoplatelets on the rutting, fatigue performance, and moisture sensitivity of hot-mix asphalt", **International Journal of Pavement Research and Technology**, 1-14.

- Guerrero Contreras, J. and Caballero Briones, F. (2015) “Graphene oxide powders with different oxidation degree, prepared by synthesis variations of the Hummers method”, *Materials Chemistry and Physics*, 153, 209-220.
- Habib, N. Z., Aun, N. C., Zoorob, S. E. and Lee, P. I. (2015) “Use of graphene oxide as a bitumen modifier: an innovative process optimization study”, *Advanced Materials Research*, 1105, 365-369.
- Hafeez, M., Ahmad, N., Kamal, M. A., Rafi, J. H., Muhammad Faizanul and Jamal Zaidi, S. B. A. N., Muhammad Ali. (2019) “Experimental investigation into the structural and functional performance of graphene nano-platelet (GNP)-doped asphalt”, *Applied Sciences*, 9(4), 686.
- Han, M., Li, J., Muhammad, Y., Hou, D., Zhang, F., Yin, Y. and Duan, S. (2018) “Effect of polystyrene grafted graphene nanoplatelets on the physical and chemical properties of asphalt binder”, *Construction and Building Materials*, 174, 108-119.
- Han, M., Muhammad, Y., Wei, Y., Zhu, Z., Huang, J. and Li, J. (2021) “A review on the development and application of graphene based materials for the fabrication of modified asphalt and cement”, *Construction and Building Materials*, 285, 122885.
- He, J., Hu, W., Xiao, R., Wang, Y., Polaczyk, P. and Huang, B. (2022) “A review on Graphene/GNPs/GO modified asphalt”, *Construction and Building Materials*, 330, 127222.
- Huang, J., Liu, Y., Muhammad, Y., Li, J. Q., Ye, Y., Li, J., Li, Z. and Pei, R. (2022) “Effect of glutaraldehyde-chitosan crosslinked graphene oxide on high temperature properties of SBS modified asphalt”, *Construction and Building Materials*, 357, 129387.
- Hunter, R. N., Self, A., Read, J. and Hobson, E. (2015) The shell bitumen handbook, *Ice Publishing London, UK*,
- Ilıcalı, M., Tayfur, S., Özer, H., Sönmez, İ. and Eren, K. (2001) Asfalt ve Uygulamaları, *İsfalt Bilimsel Yayınları*, İstanbul.
- Jeyapaul, R., Shahabudeen, P. and Krishnaiah, K. (2005) “Quality management research by considering multi-response problems in the Taguchi method—a review”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 26, 1331-1337.
- Jiménez-Suárez, A. and Prolongo, S. (2020) “Graphene nanoplatelets”, *Applied Sciences*, 10(5), 1753.
- Jing, F., Wang, R., Zhao, R., Li, C., Cai, J., Ding, G., Wang, Q. and Xie, H. (2023) “Enhancement of bonding and mechanical performance of epoxy asphalt bond coats with graphene nanoplatelets”, *Polymers*, 15(2), 412.

- Jyothirmai, B., Kiranmai, M. H. and Vagdevi, K. (2020) "Graphene reinforces asphalt–Doubles durability of road", *International Conference on Multifunctional Materials*, India,
- Karacasu, M. (2016) Yol üstyapı deneyleri, *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Yayınları*, Eskişehir.
- Karakaş, A. S. (2014) "Bitümlü sıcak karışımların trafik etkisi altında mekanik özelliklerinin incelenmesi", Doktora Tezi, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elazığ.
- KGM. (2013) Karayolu Teknik Şartnamesi, *Karayolları Genel Müdürlüğü*, Ankara.
- KGM."Yol Ağı Bilgileri",
<https://www.kgm.gov.tr/Sayfalar/KGM/SiteTr/Kurumsal/YolAgi.aspx>
Son erişim tarihi: 01.06.2024.
- Koh, S., Noda, S. and Taguchi, S. (2023) "Population dynamics in the biogenesis of single-/multi-layered membrane vesicles revealed by encapsulated GFP-monitoring Analysis", *Applied Microbiology*, 3(3), 1027-1036.
- Krishnaiah, K. and Shahabudeen, P. (2012) Applied design of experiments and Taguchi methods, *PHI Learning Private Limited*, New Delhi.
- Kuloğlu, N., Yılmaz, M. and Kök, B. V. (2008) "Farklı penetrasyon derecelerine sahip asfalt çimentolarının kalıcı deformasyona karşı dayanımlarının ve işlenebilirliklerinin incelenmesi", *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 13(1).
- Kumari, P. and Samadder, S. (2022) "Valorization of carbonaceous waste into graphene materials and their potential application in water & wastewater treatment: a review", *Materials Today Chemistry*, 26, 101192.
- Kutluhan, S. (2008) "Bitümlü sıcak karışımlarda tekerlek izi oluşumunun modellenmesi", Doktora Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- Lav, A. H. and Lav, M. A. (2004) Shell bitüm el kitabı, *İsfalt Bilimsel Yayınları*, İstanbul.
- Leone, C., Di Siena, M., Genna, S. and Martone, A. (2022) "Effect of graphite nanoplatelets percentage on the in plane thermal diffusivity of ultra-thin graphene based (nanostructured) composite", *Optics & Laser Technology*, 146, 107552.
- Li, B., Liu, P., Zhao, Y., Li, X. and Cao, G. (2023) "Effect of graphene oxide in different phases on the high temperature rheological properties of asphalt based on grey relational and principal component analysis", *Construction and Building Materials*, 362, 129714.
- Li, K., Ren, H. and Huang, W. (2021) "Effect of graphene nanoplatelets (GNPs) on fatigue properties of asphalt mastics", *Materials*, 14(17), 4864.

- Li, R., Xiao, F., Amirkhanian, S., You, Z. and Huang, J. (2017) "Developments of nano materials and technologies on asphalt materials–A review", ***Construction and Building Materials***, 143, 633-648.
- Li, S., Xu, W., Zhang, F., Wu, H. and Zhao, P. (2022) "Effect of graphene oxide on the low-temperature crack resistance of polyurethane–SBS-modified asphalt and asphalt mixtures", ***Polymers***, 14(3), 453.
- Li, X., Wang, Y.-M., Wu, Y.-L., Wang, H.-R., Chen, M., Sun, H.-D. and Fan, L. (2021) "Properties and modification mechanism of asphalt with graphene as modifier", ***Construction and Building Materials***, 272, 121919.
- Li, Y., Hao, P., Zhao, C., Ling, J., Wu, T., Li, D., Liu, J. and Sun, B. (2021) "Anti-rutting performance evaluation of modified asphalt binders: A review", ***Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)***, 8(3), 339-355.
- Loudiki, A., Azriouil, M., Matrouf, M., Laghrib, F., Farahi, A., Saqrane, S., Bakasse, M., Lahrich, S. and El Mhammedi, M. (2022) "Graphene-based electrode materials used for some pesticide's detection in food samples: A review", ***Inorganic Chemistry Communications***, 144, 109891.
- Lu, X. and Isacsson, U. (2000) "Modification of road bitumens with thermoplastic polymers", ***Polymer testing***, 20(1), 77-86.
- Lu, X., Redelius, P., Soenen, H. and Thau, M. (2011) "Material characteristics of long lasting asphalt pavements", ***Road materials pavement design***, 12(3), 567-585.
- Ma, F., Luo, X., Huang, Z. and Wang, J. (2020) "Characterization of recovery in asphalt binders", ***Materials***, 13(4), 920.
- Marasteanu, M. O., Le, J.-L. and Turos, M. I. (2016) "Graphene nano-platelet (GNP) reinforced asphalt binders and mixtures", ***Proceedings of the 6th Eurasphalt & Eurobitume Congress***, Prague,
- Mercan, Ş. (2019) "Deney tasarımı ve yapay zeka tekniklerinden yararlanarak ürün kalitesinin geliştirilmesi", Yüksek Lisans Tezi, ***Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü***, Balıkesir.
- Mirza, M. W., Abbas, Z. and Rizvi, M. A. (2011) "Temperature zoning of Pakistan for asphalt mix design", ***Pakistan Journal of Engineering Applied Sciences***.
- Mola, E., Bayrak, O. Ü., Baş, F. and Bayata, H. F. (2021) "Investigating the usability of Kevlar and steel fibers as a hybrid in concrete pavements", ***Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences, Yildiz Technical University Press: Istanbul, Turkey***, 39, 1-12.

- Moreno-Navarro, F., Sol-Sánchez, M., Gámiz, F. and Rubio-Gámez, M. (2018) "Mechanical and thermal properties of graphene modified asphalt binders", *Construction and Building Materials*, 180, 265-274.
- Morova, N. (2013) "Coğrafi bilgi sistemleri ile gerçek zamanlı üstyapı yönetim sistemi geliştirilmesi", Doktora Tezi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Isparta.
- Nair, R. R., Blake, P., Grigorenko, A. N., Novoselov, K. S., Booth, T. J., Stauber, T., Peres, N. M. and Geim, A. K. (2008) "Fine structure constant defines visual transparency of graphene", *Science*, 320(5881), 1308-1308.
- Nanografi. "Graphene products and solutions", <https://nanografi.com/graphene/> Son erişim tarihi: 01.06.2024.
- Nazki, M. A., Chopra, T. and Chandrappa, A. K. (2020) "Rheological properties and thermal conductivity of bitumen binders modified with graphene", *Construction and Building Materials*, 238, 117693.
- Novoselov, K. S., Geim, A. K., Morozov, S. V., Jiang, D.-e., Zhang, Y., Dubonos, S. V., Grigorieva, I. V. and Firsov, A. A. (2004) "Electric field effect in atomically thin carbon films", *science*, 306(5696), 666-669.
- Orhan, F. (2012) "Bitümlü karışımlar laboratuvarı çalışmaları", *Karayolları Genel Müdürlüğü*.
- Orhan, K. and Bahadır, O. (2023) "Geri dönüştürülmüş farklı inşaat ve yıkıntı atıklarının yol temellerinde kullanımının maliyet ve esnek üstyapı kalınlığına etkisinin araştırılması", *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi*, 13(2), 734-751.
- Öztürk, E. A. (2004) "Karayolu esnek üstyapı tasarımında yeni bir yöntem: yüksek performanslı asfalt kaplama", *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 19(2).
- Papadimitropoulos, V. C., Karatzas, S. K. and Chassiakos, A. P. (2018) "Applications of nanomaterials in pavement engineering: A review", *The tenth International Conference on Construction in the 21st Century*, Sri Lanka,
- Polo-Mendoza, R., Navarro-Donado, T., Ortega-Martinez, D., Turbay, E., Martinez-Arguelles, G. and Peñabaena-Niebles, R. (2023) "Properties and characterization techniques of graphene modified asphalt binders", *Nanomaterials*, 13(5), 955.
- Qian, H., Li, Y., Ding, R., Han, H., Zou, X., Zhang, Y. and Zhu, S. (2022) "Rheological properties and antiaging performance of graphene oxide-modified bio-asphalt", *Advances in Materials Science and Engineering*, 2022.

- Qiao, Y., Wang, Y., Tian, H., Li, M., Jian, J., Wei, Y., Tian, Y., Wang, D.-Y., Pang, Y. and Geng, X. (2018) "Multilayer graphene epidermal electronic skin", *ACS nano*, 12(9), 8839-8846.
- Rajkumar, G., Saravanan, M., Bejaxhin, A. B. H., Sharma, S., Dwivedi, S. P., Kumar, R. and Singh, S. (2023) "Parametric optimization of powder-mixed EDM of AA2014/Si3N4/Mg/cenosphere hybrid composites using fuzzy logic: Analysis of mechanical, machining, microstructural, and morphological characterizations", *Journal of Composites Science*, 7(9), 380.
- Read, J. and Whiteoak, D. (2003) The shell bitumen handbook, *Thomas Telford Publishing*, London.
- Roy, R. K. (2010) A primer on the Taguchi method, *Society of Manufacturing Engineers*, United States of America.
- Sağlık, A. and Güngör, A. (2008) Karayolları esnek üstyapılar projelendirme rehberi, *Karayolları Genel Müdürlüğü Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı Üstyapı Şubesi Müdürlüğü*, Ankara.
- Sarsam, S. I. (2013) "Effect of nano materials on asphalt cement properties", *International Journal of Scientific Research in Knowledge*, 1(10), 422.
- Sengoz, B. and 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.
- SHRP. (1993) "Distress identification manual for the long-term pavement performance project", *Strategic Highway Research Program*, Washington.
- Song, J., Wang, X. and Chang, C.-T. (2014) "Preparation and characterization of graphene oxide", *Journal of Nanomaterials*, 2014.
- Stoller, M. D., Park, S., Zhu, Y., An, J. and Ruoff, R. S. (2008) "Graphene-based ultracapacitors", *Nano letters*, 8(10), 3498-3502.
- Şeker, N. E. A. and Sarıışık, A. (2020) "Bitümlü sıcak karışımlarda kireçtaşı ve volkanik cüruf filler kullanımının dayanıma etkisinin araştırılması", *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 35(4), 1047-1058.
- Şimşek, A. (2021) "Grafen ile modifiye edilmiş bitümlerin optimizasyonu", Yüksek Lisans Tezi, *Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Erzurum.
- Şimşek, M. (2024) "Çankırı ili Korgun-Kurşunlu ilçeleri arası andezit ve kalker ortak kullanımı ile bitümlü sıcak karışım dizaynı", Yüksek Lisans Tezi, *Çankırı Karatekin Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Çankırı.

- Şiş, A. (2000) "Şartname sınırlarındaki agrega granülometrisinin asfalt betonunun fiziksel özelliklerine ve optimum bitüm oranına etkisi", Yüksek Lisans Tezi, **Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Elazığ.
- Taşdemir, Y. (2003) "Bitümlü kaplamaların termal davranışlarının performans testleri ile incelenmesi", Doktora Tezi, **İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul.
- Tunç, A. (2004a) Esnek kaplama malzemeleri elkitabı, **Asil Yayın Dağıtım**, Ankara.
- Tunç, A. (2004b) Kaplama mühendisliği ve uygulamaları, **Asil Yayın Dağıtım**, Ankara.
- Tunç, A. (2007) Yol malzemeleri (agrega, asfalt, bitümlü karışımlar, beton, zemin) ve uygulamaları (kaplamalar ve zemin ıslahı-dizayn ve yapım metotları), **Nobel Yayın Dağıtım**, Ankara.
- TÜİK. "Dünya Nüfus Günü", <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Dunya-Nufus-Gunu-2023-49688> Son erişim tarihi: 01.06.2024.
- Ullidtz, P. (1987) "Pavement Analysis: Developments in Civil Engineering", **Transport Research International Documentation**, Amsterdam.
- Uluçaylı, M. and Yavuz, A. (2002) Asfalt el kitabı, **İsfalt Bilimsel Yayın**, İstanbul.
- Umar, F. and Açar, E. (1991) Yol üstyapısı, **İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Matbaası**, İstanbul.
- Üstünkol, F. N. E. (2006) "Endüstriyel atıkların esnek yol üstyapısında kullanılabilirliğinin araştırılması", Yüksek Lisans Tezi, **Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Balıkesir.
- Wang, F., Zhang, L., Zhang, X., Li, H. and Wu, S. (2020) "Aging mechanism and rejuvenating possibility of SBS copolymers in asphalt binders", **Polymers**, 12(1), 92.
- Wang, R., Qi, Z., Li, R. and Yue, J. (2020) "Investigation of the effect of aging on the thermodynamic parameters and the intrinsic healing capability of graphene oxide modified asphalt binders", **Construction and Building Materials**, 230, 116984.
- Wang, Y., Polaczyk, P., He, J., Lu, H., Xiao, R. and Huang, B. (2022) "Dispersion, compatibility, and rheological properties of graphene-modified asphalt binders", **Construction and Building Materials**, 350, 128886.
- Werkovits, S., Bacher, M., Mirwald, J., Theiner, J., Rosenau, T., Hofko, B. and Grothe, H. (2023) "The impact of field ageing on molecular structure and chemistry of bitumen", **Fuel**, 343, 127904.

- Wilmoth, J., Menozzi, C. and Bassarsky, L. (2021) "Global population growth and sustainable development", *United Nations, New York*.
- Wu, H., Shen, A., Pan, H., Hou, X., Yu, P. and Li, Y. (2022) "Mechanism of multilayer graphene nanoplatelets and its effects on the rheological properties and thermal stability of styrene-butadiene-styrene modified asphalt", *Diamond Related Materials*, 130, 109434.
- Xu, F., Zhao, Y. and Li, K. (2021) "Using waste plastics as asphalt modifier: A review", *Materials*, 15(1), 110.
- Yang, L., Zhou, D. and Kang, Y. (2020) "Rheological properties of graphene modified asphalt binders", *Nanomaterials*, 10(11), 2197.
- Yang, Q., Liu, Q., Zhong, J., Hong, B., Wang, D. and Oeser, M. (2019) "Rheological and micro-structural characterization of bitumen modified with carbon nanomaterials", *Construction and Building Materials*, 201, 580-589.
- Yayla, N. (2014) Karayolları mühendisliği, *Birsen Yayınevi*, İstanbul.
- Yeğinobalı, A. (2009) Niçin beton yol?, *Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği*, Ankara.
- Yılmaz, M., Kök, B. V., Kuloğlu, N. and Alataş, T. (2013) "Elastomer türü polimerler ile modifiye edilmiş bitümlü bağlayıcıların depolama stabilitelerinin ve reolojik özelliklerinin incelenmesi", *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 15(43), 67-77.
- Yükü, K., Öztürk, T. and Komut, M. (2021) Bitümlü bağlayıcılar laboratuvar el kitabı, *Karayolları Genel Müdürlüğü Araştırma ve Geliştirme Dairesi Başkanlığı Üstyapı Geliştirme Şubesi Müdürlüğü*, Ankara.
- Zeng, Q., Liu, Y., Liu, Q., Liu, P., He, Y. and Zeng, Y. (2020) "Preparation and modification mechanism analysis of graphene oxide modified asphalts", *Construction and Building Materials*, 238, 117706.
- Zeng, W., Wu, S., Pang, L., Sun, Y. and Chen, Z. (2017) "The utilization of graphene oxide in traditional construction materials: Asphalt", *Materials*, 10(1), 48.
- Zhou, H.-Y., Dou, H.-B. and Chen, X.-H. (2021) "Rheological properties of graphene/polyethylene composite modified asphalt binder", *Materials*, 14(14), 3986.
- Zhu, J., Zhang, K., Liu, K. and Shi, X. (2020) "Adhesion characteristics of graphene oxide modified asphalt unveiled by surface free energy and AFM-scanned micro-morphology", *Construction and Building Materials*, 244, 118404.