



**GRAFEN VE KENEVİR YAĞI İLE MODİFİYE
EDİLMİŞ BİTÜM VE BİTÜMLÜ KARIŞIMLARIN
PERFORMANSININ ARAŞTIRILMASI**

Ahmet Oğuz DEMİRİZ

**Danışman: Doç. Dr. Osman Ünsal BAYRAK
Doktora Tezi
İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı
2024**

(Her hakkı saklıdır.)

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**GRAFEN VE KENEVİR YAĞI İLE MODİFİYE EDİLMİŞ BİTÜM VE BİTÜMLÜ
KARIŞIMLARIN PERFORMANSININ ARAŞTIRILMASI**

(Investigation of The Performance of Bitumen and Bituminous Mixtures Modified with
Graphene and Hemp Oil)

DOKTORA TEZİ

Ahmet Oğuz DEMİRİZ

Danışman: Doç. Dr. Osman Ünsal BAYRAK

Erzurum
Haziran 2024

KABUL VE ONAY TUTANAĞI

Ahmet Oğuz DEMİRİZ tarafından hazırlanan “Grafen ve Kenevir Yağı ile Modifiye Edilmiş Bitüm ve Bitümlü Karışımların Performansının Araştırılması” başlıklı çalışması 26 / 06 / 2024 tarihinde yapılan tez savunma sınavı sonucunda başarılı bulunarak jürimiz tarafından İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalında, Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı:	Prof. Dr. Ahmet TORTUM <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı ıslak imzalıdır
Danışman:	Doç. Dr. Osman Ünsal BAYRAK <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı ıslak imzalıdır
Jüri Üyesi:	Prof. Dr. Muhammet Vefa AKPINAR <i>Karadeniz Teknik Üniversitesi</i>	Aslı ıslak imzalıdır
Jüri Üyesi:	Doç. Dr. Halim Ferit BAYATA <i>Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi</i>	Aslı ıslak imzalıdır
Jüri Üyesi:	Doç. Dr. Ahmet ATALAY <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı ıslak imzalıdır

Enstitü Yönetim Kurulunun
.../.../.... tarih ve sayılı
kararı.

Bu tezin Atatürk Üniversitesi Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği'nin ilgili maddelerinde belirtilen şartları yerine getirdiğini onaylarım.

Prof. Dr. Saltuk Buğrahan CEYHUN
Enstitü Müdürü

Aslı ıslak imzalıdır

Bu çalışma Atatürk Üniversitesi BAP projeleri kapsamında desteklenmiştir.
Proje No: **FDK-2022-10602**

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildiriş, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU

Doktora Tezi olarak *Doç. Dr. Osman Ünsal BAYRAK* danışmanlığında sunulan “Grafen ve Kenevir Yağı ile Modifiye Edilmiş Bitüm ve Bitümlü Karışımların Performansının Araştırılması” başlıklı çalışmanın tarafımızdan bilimsel etik ilkelere uyularak yazıldığını, yararlanılan eserlerin kaynakçada gösterildiğini, Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından belirlenmiş olan Turnitin Programı benzerlik oranlarının aşılmadığını ve aşağıdaki oranlarda olduğunu beyan ederiz.

Tez Bölümleri	Tezin Benzerlik Oranı (%)	Maksimum Oran (%)
Giriş	3	30
Kuramsal Temeller	5	30
Materyal ve Yöntem	9	35
Araştırma Bulguları ve Tartışma	6	20
Sonuç ve Öneriler	6	20
Tezin Geneli	6	25

Not: Yedi kelimeye kadar benzerlikler ile Başlık, Kaynakça, İçindekiler, Teşekkür, Dizin ve Ekler kısımları tarama dışı bırakılabilir. Yukarıdaki azami benzerlik oranları yanında tek bir kaynaktan olan benzerlik oranlarının %5'den büyük olmaması gerekir.

Beyan edilen bilgilerin doğru olduğunu, aksi halde doğacak hukuki sorumlulukları kabul ve beyan ederiz.

Tez Yazarı (Öğrenci)	Tez Danışmanı
Ahmet Oğuz DEMİRİZ	Doç. Dr. Osman Ünsal BAYRAK
1.7.2024	1.7.2024
İmza:	İmza:

* Tez ile ilgili YÖKTEZ'de yayınlamasına ilişkin bir engelleme var ise aşağıdaki alanı doldurunuz.

Tezle ilgili patent başvurusu yapılması / patent alma sürecinin devam etmesi sebebiyle Enstitü Yönetim Kurulunun/.../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 2 (iki) yıl süreyle engellenmiştir.

Enstitü Yönetim Kurulunun/.../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 6 (altı) ay süreyle engellenmiştir.

TEŞEKKÜR

Doktora Tezi olarak sunduğum bu çalışmamın yürütücülüğünü üstlenen ve çalışmamın her aşamasında bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, ilgi ve desteğini esirgemeyen değerli hocam Sayın Doç.Dr. O. nsal BAYRAK’a teşekkür ederim.

Bu alışma, Atatürk Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi (BAP) tarafından desteklenen “Modifiye Edilmiş Bitümün Düşük Sıcaklıktaki Kırılma zelliklerinin Araştırılması” isimli Doktora Tez Projesi (FDK-2022-10602) kapsamında yapılmıştır. Atatürk Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimine katkılılarından dolayı teşekkür ederim.

Çalışmalarım esnasında yardımları ve nerileri ile tezimin gelişmesine katkıda bulunan değerli hocalarım Sayın Doç.Dr. Üyesi Halim Ferit BAYATA, Sayın Dr.Öğr.yesi Fatih İrfan BAŞ ve Sayın Prof.Dr. Ergün YILDIZ başta olmak üzere, her türlü yardımlarını ve kıymetli vakitlerini benden esirgemeyen Dr. Öğretim yesi M. Ali ÇOLAK, Arş. Gör. Ömer Faruk KELEŐ, Y.İnş.Müh. Mustafa ÇAKI’ya teşekkür ederim.

Tez izleme komitemde bulunarak, bu süreçte değerli görüş ve desteklerini sunan Sayın Prof. Dr. Ömer LAÇİN ve Sayın Doç.Dr. Ahmet ATALAY’a iten teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca doktora tez savunma jürimde bulunarak tezimin gelişmesine ve son halini almasında katkı sağlayan Sayın Prof. Dr. Ahmet TORTUM’a, Sayın Prof. Dr. Muhammet Vefa AKPINAR’a ve Sayın Doç. Dr. Halim Ferit BAYATA’ya teşekkür ederim.

ğrenim hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen annem Nurdan DEMİRİZ’e ve babam Nuri DEMİRİZ’e, Tez çalışmam süresince sabrını, sevgisini ve desteğini esirgemeyen eşim Hazel DEMİRİZ’e ve oğlum Ali Mirza DEMİRİZ’e teşekkür ederim.

Ahmet Oğuz DEMİRİZ

ÖZET

DOKTORA TEZİ

GRAFEN VE KENEVİR YAĞI İLE MODİFİYE EDİLMİŞ BİTÜM VE BİTÜMLÜ KARIŞIMLARIN PERFORMANSININ ARAŞTIRILMASI

Ahmet Oğuz DEMİRİZ

Danışman: Doç. Dr. Osman Ünsal BAYRAK

Amaç: Yeni nesil asfalt bağlayıcıların geliştirilmesi için grafenin ve kenevir yağının bitüme katılarak, gelişmiş özellikli modifiye bitüm ve modifiye bitümlü karışım yapılması amaçlanmaktadır. Katkı miktarının optimizasyonu da yapılarak gereksiz ya da fazla katkı kullanımının önüne geçilmesi ve ayrıca bitümlü sıcak karışımların performansını artıracak ve çatlak oluşumunu azaltacak bir tasarım yapılması amaçlanmaktadır.

Yöntem: Taguchi optimizasyon yöntemi kullanılarak 4 parametre 4 seviyeden oluşan bir deney planı hazırlanmış ve bu deney planına uygun olarak üretilen 16 karışım ile bitümün ve bitümlü karışımların fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri incelenmiştir.

Bulgular: Elastik geri dönme değerlerinin ortalamaları %5 ile 12,50 arasında değişmiştir. RTFOT kütle kaybı değerlerinin ortalamaları ‰ 27,02 ile 57,48 arasında değişmiştir. Saf bitümün yumuşama noktası değeri 45,50°C iken deney değerlerinin ortalamaları 43,90 ile 48,40°C arasında değişmiştir. Saf bitümün penetrasyon değeri 90,8 iken deney değerlerinin ortalamaları 79,03 ile 140,07 arasında değişmiştir. Marshall stabilite değerleri 911 kg ile 1178 kg arasında değişmiştir. SCB deneylerinde kırılma tokluğu değerleri 16,75 ile 29,45 $\text{Mpa}\sqrt{m}$ arasında değişmiştir. SENB deneylerinde kırılma tokluğu değerleri 22,34 ile 31,33 $\text{Mpa}\sqrt{m}$ arasında değişmiştir.

Sonuçlar: MRPI optimizasyonu sonucunda optimum parametre seviyeleri “A2, B2, C4, D2” olarak bulunmuştur. MRPI optimizasyonunda en fazla katkıyı %42,43 oranıyla grafen nanoplatelet ve %28,75 oranıyla kenevir tohumu yağı sağlamaktadır. MRPI optimum parametre seviyelerine göre yapılan doğrulama deney sonuçlarında penetrasyon %14,4, RTFOT sonrası penetrasyon %27,33, yumuşama noktası %4,62, RTFOT sonrası yumuşama noktası %4,53, stabilite %4,83, -20°C SENB kırılma tokluğu %3,43, 0°C SCB kırılma tokluğu %18,03, -20°C SCB kırılma tokluğu %50,84 oranında artmıştır.

Anahtar Kelimeler: GNP, Kenevir Tohumu Yağı, SCB, SENB, Marshall, Taguchi Yöntemi

2024, 136 sayfa

ABSTRACT

DOCTORAL DISSERTATION

INVESTIGATION OF THE PERFORMANCE OF BITUMEN AND BITUMINOUS MIXTURES MODIFIED WITH GRAPHENE AND HEMP OIL

Ahmet Oğuz DEMİRİZ

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Osman Ünsal BAYRAK

Purpose: The aim is to develop advanced modified bitumen and bituminous mixtures by incorporating graphene and hemp oil into bitumen to create next-generation asphalt binders. By optimizing the amount of additives, the objective is to prevent unnecessary or excessive use and design bituminous hot mixtures that enhance performance and reduce crack formation.

Method: Using the Taguchi optimization method, an experimental plan consisting of 4 parameters with 4 levels was prepared. In accordance with this plan, the physical, chemical, and mechanical properties of bitumen and bituminous mixtures produced with 16 different combinations were examined.

Findings: The average values of the elastic recovery ranged from 5% to 12.50%. The average mass loss values from the RTFOT mass loss test ranged from 27.02‰ to 57.48‰. While the softening point of pure bitumen was 45.50°C, the average values from the tests ranged from 43.90°C to 48.40°C. The penetration value of pure bitumen was 90.8, while the average penetration values from the tests ranged from 79.03 to 140.07. Marshall stability values ranged from 911 kg to 1178 kg. In the SCB tests, fracture toughness values ranged from 16.75 to 29.45 MPa√m. In the SENB tests, fracture toughness values ranged from 22.34 to 31.33 MPa√m.

Results: As a result of MRPI optimization, the optimum parameter levels were found to be "A2, B2, C4, D2." In MRPI optimization, the most significant contributions were from graphene nanoplatelets at 42.43% and hemp seed oil at 28.75%. In the confirmation tests based on the MRPI optimum parameter levels, the results showed an increase of 14.4% in penetration, 27.33% in penetration after RTFOT, 4.62% in softening point, 4.53% in softening point after RTFOT, 4.83% in stability, 3.43% in SENB fracture toughness at -20°C, 18.03% in SCB fracture toughness at 0°C, and 50.84% in SCB fracture toughness at -20°C.

Keywords: GNP, Hemp Seed Oil, SCB, SENB, Marshall, Taguchi Method

2024, 136 pages

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY TUTANAĞI.....	i
ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
TABLolar DİZİNİ.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
KISALTMALAR ve SİMGELER DİZİNİ	xiii
GİRİŞ.....	1
Amaç ve Kapsam	2
KURAMSAL TEMELLER.....	4
Bitümlü Bağlayıcılar	4
Bitümlü Sıcak Karışım Asfalt	4
Bitümlü sıcak karışımlarda stabilite.....	5
Bitümlü sıcak karışımlarda rijitlik	5
Bitümlü sıcak karışımlarda dayanıklılık	5
Bitümlü sıcak karışımlarda yorulma mukavemeti	5
Bitümlü sıcak karışımlarda fleksibilite	6
Bitümlü sıcak karışımlarda kayma direnci.....	6
Bitümlü sıcak karışımlarda geçirimsizlik	6
Bitümlü sıcak karışımlarda işlenebilirlik	6
Bitümün reolojik özellikleri	6
Bitümlü Sıcak Karışımlarda Meydana Gelen Bozulmalar.....	7
Tekerlek izleri	8
Ondülasyonlar	10
Kabarmalar.....	10
Timsah sırtı çatlamlar.....	10
Düşük sıcaklık çatlakları	11
Modifiye Edilmiş Bitüm ve Bitümlü Karışımlar	12

Kırılma Mekanik Prensipleri ile Bitümlü Sıcak Karışımların Çatlak İlerleyişine Karşı Dayanımlarının Belirlenmesi	12
Literatür Özeti	14
Grafen katkı maddesinin kullanıldığı çalışmalar	15
Grafen oksit (GO) katkı maddesinin kullanıldığı çalışmalar	18
Grafen nanoplatelet (GNP) katkı maddesinin kullanıldığı çalışmalar	20
Kenevir tohumu yağının kullanıldığı çalışmalar	23
Çeşitli bitkisel yağların kullanıldığı çalışmalar	24
Kırılma özelliklerinin incelendiği araştırmalar	26
MATERYAL ve YÖNTEM	29
Materyal	29
Bitüm	29
Agrega ve Filler	29
Kaba agrega özgül ağırlık deneyi	30
İnce agrega özgül ağırlık deneyi	31
Filler özgül ağırlık deneyi	33
Grafen Nanoplatelet (GNP)	34
Kenevir tohumu yağı	34
Method	35
Taguchi yöntemi	35
Modifiye bitümün hazırlanması	36
Modifiye bitüme uygulanan deneyler	37
Bitüm özgül ağırlık tayini deneyi	38
Penetrasyon deneyi	38
Yumuşama noktası deneyi	39
Penetrasyon indeksi	40
Parlama noktası deneyi	40
Dönel ince film halinde ısıtma deneyi ve kütle kaybı	41
Elastik geri dönme deneyi	42
Marshall stabilite ve akma deneyi ile tasarım	43
Yarım daire eğilme deneyi (Semi circular bending - SCB)	48
Kiriş eğilme deneyi (Single-Edge Notched Beam - SENB)	52
Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FTIR)	56
Geçirimli elektron mikroskobu (TEM)	56
ARAŞTIRMA BULGULARI	57

RTFOT Öncesi Penetrasyon Deneyi Sonuçları.....	57
RTFOT Sonrası Penetrasyon Deneyi Sonuçları.....	60
RTFOT Öncesi Yumuşama Noktası Deneyi Sonuçları	64
RTFOT Sonrası Yumuşama Noktası Deneyi Sonuçları	67
Penetrasyon İndeksi	70
Parlama Noktası Deney Sonuçları	71
RTFOT Kütle Kaybı Sonuçları	72
Elastik Geri Dönme Deneyi Sonuçları	74
Marshall Stabilite Deneyi Sonuçları	77
0°C Sıcaklıkta Yarım Daire Eğilme Deneyi (SCB) Sonuçları.....	84
-20°C Sıcaklıkta Yarım Daire Eğilme Deneyi (SCB) Sonuçları	87
0°C Sıcaklıkta Kiriş Eğilme Deneyi (SENB) Sonuçları	90
-20°C sıcaklıkta Kiriş Eğilme Deneyi (SENB) Sonuçları	93
Çoklu Yanıt Performans İndeksi (MRPI) ile Optimizasyon	97
FTIR Analiz Sonuçları	103
Geçirimli Elektron Mikroskobu (TEM) Görüntüleri	105
SONUÇLAR ve ÖNERİLER	108
KAYNAKLAR.....	114
ÖZGEÇMİŞ.....	120

TABLolar DİZİNİ

Tablo 1. B 70/100 Penetrasyonlu Saf Bitümün Özellikleri	29
Tablo 2. Agregaların Eleme Analizi	30
Tablo 3. Agregaların Fiziksel Özellikleri	34
Tablo 4. Grafen Nanoplateletlerin Özellikleri	34
Tablo 5. Deney Karışımlarının Parametreleri ve Seviyeleri	36
Tablo 6. Deney Planı	36
Tablo 7. RTFOT Öncesi Penetrasyon Deney Sonuçları ve S/N Değerleri	57
Tablo 8. RTFOT Öncesi Penetrasyon Deneylerinde Ortalama S/N Etkileri	58
Tablo 9. RTFOT Öncesi Penetrasyon İçin Performans Tahminleri.....	58
Tablo 10. RTFOT Öncesi Penetrasyon Deneylerine Ait ANOVA Tablosu.....	59
Tablo 11. RTFOT Öncesi Penetrasyon İçin Performans Tahminleri.....	60
Tablo 12. RTFOT Sonrası Penetrasyon Deney Sonuçları ve S/N Değerleri	61
Tablo 13. RTFOT sonrası penetrasyon deneylerinde ortalama S/N etkileri.....	61
Tablo 14. RTFOT Sonrası Penetrasyon İçin Performans Tahminleri.....	62
Tablo 15. RTFOT Sonrası Penetrasyon Deneylerine Ait ANOVA Tablosu	63
Tablo 16. RTFOT Sonrası Penetrasyon İçin Performans Tahminleri.....	63
Tablo 17. RTFOT Öncesi Yumuşama Noktası Deney Sonuçları ve S/N Değerleri.....	64
Tablo 18. RTFOT Öncesi Yumuşama Noktası Deneylerinde Ortalama S/N Etkileri	65
Tablo 19. RTFOT Öncesi Yumuşama Noktası İçin Performans Tahminleri.....	65
Tablo 20. RTFOT Öncesi Yumuşama Noktası Deneylerine Ait ANOVA Tablosu.....	66
Tablo 21. RTFOT Öncesi Yumuşama Noktası İçin Performans Tahminleri.....	67
Tablo 22. RTFOT Sonrası Yumuşama Noktası Deney Sonuçları ve S/N Değerleri	67
Tablo 23. RTFOT Sonrası Yumuşama Noktası Deneylerinde Ortalama S/N Etkileri	68
Tablo 24. RTFOT Sonrası Yumuşama Noktası İçin Performans Tahminleri.....	68
Tablo 25. RTFOT Sonrası Yumuşama Noktası Deneylerine Ait Anova Tablosu.....	69
Tablo 26. RTFOT Sonrası Yumuşama İçin Performans Tahminleri	70
Tablo 27. Penetrasyon İndeksi Tablosu	71
Tablo 28. Parlama Noktası Deney Sonuçları	72
Tablo 29. RTFOT Kütle Kaybı Deney Sonuçları ve S/N Değerleri.....	72
Tablo 30. RTFOT Kütle Kaybı Deneylerinde Ortalama S/N Etkileri	73
Tablo 31. RTFOT Kütle Kaybı İçin Performans Tahminleri	73

Tablo 32. RTFOT Kütle Kaybı Deneilerine Ait ANOVA Tablosu.....	74
Tablo 33. Elastik Geri Dönme Deney Sonuçları ve S/N Değerleri	75
Tablo 34. Elastik Geri Dönme Deneilerinde Ortalama S/N Etkileri.....	75
Tablo 35. Elastik Geri Dönme Deneyi İçin Performans Tahminleri	76
Tablo 36. Elastik Geri Dönme Deneilerine Ait Anova Tablosu.....	77
Tablo 37. Optimum Bitüm Oranının Belirlenmesi İçin Deney Sonuçları	78
Tablo 38. Optimum Bitüm Yüzdesi İle Marshall Stabilite Deney Sonuçları	80
Tablo 39. Marshall Stabilite Deneilerinde Ortalama S/N etkileri.....	82
Tablo 40. Marshall Stabilite İçin Performans Tahminleri	82
Tablo 41. Marshall Stabilite Deneilerine Ait ANOVA Tablosu.....	83
Tablo 42. 0°C SCB Deney Sonuçları ve S/N Etkileri.....	84
Tablo 43. 0°C Yarım Daire Eğilme Deneilerinde Ortalama S/N Etkileri.....	84
Tablo 44. 0°C SCB Kırılma Tokluğu İçin Performans Tahminleri	85
Tablo 45. 0°C SCB Deneilerine Ait ANOVA Tablosu	86
Tablo 46. -20°C SCB Deney Sonuçları ve S/N Etkileri	87
Tablo 47. -20°C Yarım Daire Eğilme Deneilerinde Ortalama S/N Etkileri	88
Tablo 48. -20°C SCB Kırılma Tokluğu İçin Performans Tahminleri.....	88
Tablo 49. -20°C SCB deneilerine ait ANOVA tablosu	89
Tablo 50. 0°C SENB Deney Sonuçları ve S/N Etkileri.....	90
Tablo 51. Kiriş Eğilme Deneilerinde Ortalama S/N Etkileri.....	91
Tablo 52. 0°C SENB Kırılma Tokluğu İçin Performans Tahminleri	91
Tablo 53. 0°C SENB Deneilerine Ait ANOVA Tablosu.....	92
Tablo 54. -20°C SENB Deney Sonuçları ve s/n Etkileri	94
Tablo 55. -20°C Kiriş Eğilme Deneilerinde Ortalama S/N Etkileri	94
Tablo 56. -20°C SENB Kırılma Tokluğu İçin Performans Tahminleri.....	94
Tablo 57. -20°C SENB Deneilerine Ait ANOVA Tablosu	95
Tablo 58. Çoklu Yanıt Performans İndeksi	98
Tablo 59. MRPI Ortalama S/N Etkileri	99
Tablo 60. MRPI İçin Performans Tahminleri	99
Tablo 61. MRPI ANOVA Tablosu	100
Tablo 62. MRPI Doğrulama Deney Sonuçları.....	101
Tablo 63. Radar Grafik İçin Dönüşüm Tablosu.....	101

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Bitümlü bağlayıcıların sınıflandırılması	4
Şekil 2. Yapısal tekerlek izi.....	9
Şekil 3. Sıkışma-oturma tekerlek izi	9
Şekil 4. Akma tekerlek izi	10
Şekil 5. Timsah sırtı çatlama	11
Şekil 6. Düşük sıcaklık çatlaklarının büyümesi	11
Şekil 7. Düşük sıcaklık çatlak tipleri.....	12
Şekil 8. Kırılma modları.....	13
Şekil 9. Sabit deformasyon hızlı yöntem deneyleri.....	14
Şekil 10. Gradasyon eğrisi	30
Şekil 11. Kaba agrega özgül ağırlık deney numuneleri.....	31
Şekil 12. İnce agrega deney görselleri.....	32
Şekil 13. Filler özgül ağırlık deney görselleri	33
Şekil 14. Yüksek hızlı mikser ve ısıtıcı kap	37
Şekil 15. Piknometre ve tartım işlemi	38
Şekil 16. Penetrasyon deney cihazı	39
Şekil 17. Yumuşama noktası deney düzeneği	40
Şekil 18. Parlama noktası deney cihazı	41
Şekil 19. RTFOT cihazı ve numuneleri	41
Şekil 20. Elastik geri dönme deney cihazı ve numuneleri	42
Şekil 21. Etüv cihazı.....	43
Şekil 22. Çalışmada kullanılan mikser, su banyosu ve numune krikosu	44
Şekil 23. Marshall kompaktör ve stabilite cihazları	45
Şekil 24. Marshall Stabilite ve akma deneyi	46
Şekil 25. Marshall stabilite ve akma deneyi uygulanan numuneler	47
Şekil 26. Yoğurmalı sıkıştırıcı (Gyratory)	49
Şekil 27. SCB numunesinin oluşturulma aşamaları	49
Şekil 28. Çentik açmak için kullanılan düzenek	50
Şekil 29. SCB deney numuneleri	51
Şekil 30. SCB deney düzeneği	51
Şekil 31. SCB deneyi	52

Şekil 32. SENB Deney düzeneği ve numune boyutları (Yılmaz, 2013).....	53
Şekil 33. Kiriş numune kompaktörü.....	54
Şekil 34. SENB deneyi.....	55
Şekil 35. SENB deney numuneleri.....	56
Şekil 36. RTFOT öncesi penetrasyon deneylerinde performans istatistiği.....	59
Şekil 37. RTFOT sonrası penetrasyon deneylerinde performans istatistiği.....	62
Şekil 38. RTFOT Öncesi Yumuşama Noktası Deneylerinde Performans İstatistiği	66
Şekil 39. RTFOT sonrası yumuşama noktası deneylerinde performans istatistiği	69
Şekil 40. Penetrasyon indeks grafiği	71
Şekil 41. RTFOT kütle kaybı deneylerinde performans istatistikleri	74
Şekil 42. Elastik geri dönme deneylerinde performans istatistikleri.....	76
Şekil 43. Marshall grafikleri.....	79
Şekil 44. Marshall Stabilite deneylerinde performans istatistiği.....	83
Şekil 45. 0°C SCB deneylerinde performans istatistiği	85
Şekil 46. 0°C Sıcaklıkta kırılan SCB numuneleri	87
Şekil 47. -20°C SCB deneylerinde performans istatistiği	89
Şekil 48. -20°C Sıcaklıkta kırılan SCB numuneleri.....	90
Şekil 49. 0°C SENB deneylerinde performans istatistiği.....	92
Şekil 50. 0°C Sıcaklıkta kırılan SENB numuneleri.....	93
Şekil 51. -20°C SENB deneylerinde performans istatistiği	95
Şekil 52. -20°C Sıcaklıkta kırılan SENB numuneleri	96
Şekil 53. MRPI performans istatistiği	100
Şekil 54. Deney tahmin grafiği	102
Şekil 55. Saf bitüm FTIR spektrumu	103
Şekil 56. 4 numaralı modifiye bitümün FTIR spektrumu	103
Şekil 57. 6 numaralı modifiye bitümün FTIR spektrumu	104
Şekil 58. 13 numaralı modifiye bitümün FTIR spektrumu	104
Şekil 59. 16 numaralı modifiye bitümün FTIR spektrumu	105
Şekil 60. 4 numaralı karışımın TEM görüntüleri	106
Şekil 61. 13 numaralı karışımın TEM görüntüleri	107

KISALTMALAR ve SİMGELER DİZİNİ

Kısaltmalar

BSK	Sıcak Karışım Asfalt
FTIR	Fourier Dönüşümü Kızılötesi Spektroskopisi
GNP	Grafen Nanoplatelet
MRPI	Ağırlıklar ve Çoklu Yanıt Performans İndeksleri
RTFOT	Dönel ince film halinde ısıtma deneyi
TEM	Geçirimli Elektron Mikroskobu
VFA	Bitüm ile Dolu Boşluk (%)
VMA	Agregalar Arasındaki Boşluk (%)
SCB	Yarım Daire Eğilme Deneyi (Semi Circular Bending)
SENB	Kiriş Eğilme Deneyi (Single Edge Notched Bending)
GO	Grafen Oksit
SBS	Stiren Bütadien Stiren
DSR	Dinamik Kesme Reometresi
KGM	Karayolları Genel Müdürlüğü
XRD	X-Işını Kırınım Yöntemi
XPS	X-Işını Fotoelektron Spektroskopi
CNT	Karbon Nanotüp
PI	Penetrasyon İndeksi
MQ	Marshall Oranı
PE	Polietilen

Simgeler

F(a/W)	Geometrik Düzeltme Faktörü
K _c	Kırılma Tokluğu
S/N	Taguchi Yönteminde Performans İstatistiği
W	Numune Yüksekliği
a	Çentik Yüksekliği
b	Kiriş Numune Kalınlığı
S	Mesnetler Arası Mesafe
D	Numune Çapı

t	Yarım Daire Numune Kalınlığı
P	Yük
σ	Gerilme
D_p	Sıkıştırılmış Karışımın Hacim Özgöl Ağırlığı
D_t	Bitümlü Karışımın Teorik Maksimum Özgöl Ağırlığı
G_{sa}	Zahiri Özgöl Ağırlık
G_{sb}	Hacim Özgöl Ağırlık
G_{se}	Efektif Özgöl Ağırlık
$S\%$	Su Emme Kapasitesi
R_E	Elastik Geri Dönme Değeri
c	Marshall Düzeltme Katsayısı
G_{mb}	Numunenin Özgöl Ağırlığı
V_h	Hava Boşluğu
V_a	Numunenin Agrega Hacminin Yüzdesi
V_b	Numunenin Efektif Bitüm Hacminin Yüzdesi

GİRİŞ

Ülkemizde ulaşım sisteminin büyük bir çoğunluğunu karayolları oluşturmaktadır. Yol kaplama tabakası olarak genellikle bitümlü sıcak karışım kaplamalar (BSK) kullanılmaktadır. BSK genellikle agrega, asfalt bağlayıcı ve hava boşluğundan oluşan heterojen, yarı kırılğan bir kompozit malzemedir (Xue *et al.* 2020; Bui and Saleh, 2021). Birinci sınıf yollarda karayolu tasarımı minimum 10-20 senelik hizmet ömrü belirlenerek yapılmaktadır. Ancak ülkemizde yapılan bu yollarda gerek işçilik hataları gerek projelendirme sırasındaki tasarım hatalarından dolayı inşa edilen yollar hizmet ömrünü tamamlayamadan deforme olmaktadır. Bitümlü sıcak karışımların mekanik özellikleri, asfalt bağlayıcıların özelliklerinden büyük ölçüde etkilenmektedir. Asfalt bağlayıcıların düşük performansı, esnek üstyapılarda yorulma çatlama ve düşük sıcaklık çatlama gibi çeşitli sorunlara yol açabilmektedir (Tunç, 2004). Çevresel etkiler ile günlük ve mevsimsel olarak meydana gelen veya trafik yüklerinin sebep olduğu mekanik etkilerden dolayı çatlaklar oluşmaktadır. Asfalt betonunun çatlama, asfalt kaplama tasarımında ana endişelerden biridir. Çatlama; kırılma ve yorgunluk çatlama olarak sınıflandırılabilir (Bui and Saleh, 2021). Asfalt betonunun düşük sıcaklıkta kırılması, asfalt kaplamanın temel bozulmalarından biridir ve kaplamanın dayanıklılığını önemli ölçüde azaltmaktadır (Xue *et al.* 2020). Düşük sıcaklıkta oluşan çatlaklar zaman içerisinde BSK tabakalarında yayılarak yol kaplamasının yapısal bütünlüğünü bozmaktadır. Bu hasarlar kaplamaların bakım ve onarım masraflarını önemli ölçüde artırarak ülke ekonomisine zarar vermektedir. Bu nedenle BSK kaplamalardaki çatlak oluşumu ve gelişimi davranışının araştırılması birçok araştırmacı için karayolu yapım ve onarım bakımından önemli bir konu haline gelmektedir (Marasteanu *et al.* 2004; Artamendi and Khalid, 2006; Marasteanu *et al.* 2007; Yılmaz, 2011; Yılmaz, 2013). BSK maliyetinin yaklaşık %66'sını oluşturan bitüm, kaplamanın performansında hayati bir rol oynamaktadır (Panda *et al.* 2018). Asfalt kaplama üzerindeki bu gibi sorunların üstesinden gelmek için yaygın yaklaşımlardan biri, farklı katkı maddeleri kullanılarak asfalt bağlayıcıları modifiye etmektir.

Son yıllarda araştırmacılar bitümlü sıcak karışımların performans özelliklerini arttırmak için çeşitli katkı maddeleri kullanarak modifiye edilmiş bitümlü karışımlar oluşturmaktadır. Bu katkı malzemelerinden biri olan grafen nanoplateletin, yeni nesil asfalt bağlayıcıların geliştirilmesi için önemli bir malzeme olduğu kabul edilmektedir (Choi *et al.* 2010; Potts *et al.* 2011; Hafeez *et al.* 2019; Jiménez-Suárez and Prolongo, 2020). Katkı malzemesi olarak bitkisel yağlarda sıklıkla kullanılmaktadır. Son zamanlarda yapılan çalışmalarda çeşitli bitkisel yağlar

kapsamlı olarak incelenmiştir. Bu bitkisel yağlar gıda sektöründe de kullanılan yağlar olmasından dolayı başka sektörlerde kullanımlarının artması gıda güvenliğinde risk teşkil etmektedir. Araştırmacılar yeni endüstriyel uygulamalar için gıda sektöründe kullanılmayan tohum yağları üzerine çalışmalar yapmaktadır. Kenevir tohumu yağı gıda sektöründe nadiren kullanılmasının yanı sıra endüstriyel kullanımı üzerine yapılan çalışmaların sayısı da oldukça azdır (Li, 2018; Serin and Demirezer, 2021). GNP ve kenevir tohumu yağı ile modifiye bitüm hazırlanması için karıştırma sıcaklığı ve karıştırma süresi yapılan çalışmalarda genellikle sabit olarak kullanılmıştır (Le *et al.* 2016; Hafeez *et al.* 2019; Serin and Demirezer, 2021).

Amaç ve Kapsam

Bu çalışmada yeni nesil asfalt bağlayıcıların geliştirilmesi için grafen nanoplatelet ve kenevir tohumu yağı ile modifiye edilen bitümün fiziksel, mekanik ve kimyasal özellikleri araştırılmıştır. Daha önceki çalışmalarda genellikle tek bir karıştırma sıcaklığı ve karıştırma süresi kullanılarak modifiye bitümler hazırlanmıştır. Bu çalışmada modifiye bitüm hazırlanmasında grafen nanoplatelet, kenevir tohumu yağı, sıcaklık ve süre parametreleri 4 farklı seviyede kullanılarak her bir parametrenin etkisi ayrı ayrı incelenebilmesi için Taguchi yöntemi kullanılmıştır. Bu sayede katkıların, karıştırma sıcaklıklarının ve sürelerinin etkileri incelenerek tahminler yapılmış ve her deney için optimum seviyeler belirlenmesi amaçlanmıştır.

Modifiye edilen bitümlerin fiziksel özelliklerini belirlemek amacıyla penetrasyon, yumuşama noktası, parlama noktası, kütle kaybı deneyleri yapılmıştır. Mekanik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla elastik geri dönme deneyi yapılmıştır. Modifiye bitümler ile hazırlanan bitümlü sıcak karışımların mekanik özelliklerinin belirlenebilmesi amacıyla Marshall stabilite ve akma deneyi, düşük sıcaklıktaki kırılma özelliklerinin belirlenmesi amacıyla yarım daire eğilme deneyi ve kiriş eğilme deneyleri yapılmıştır. Daha önceki çalışmalarda kiriş eğilme deneyinde bir standart olmamasından dolayı farklı numune boyutları ve numune sıkıştırma yöntemleri kullanılmıştır. Bu çalışmada numunelerin sıkıştırılması için yeni bir kiriş kompaktörü tasarlanarak yaptırılmıştır. Kiriş kompaktörü; bir Marshall kompaktörün üzerinde yapılacak basit değişiklikler ile dönüştürülebilecek şekilde tasarlandığı için kiriş numunelerinin üretimini kolaylaştırması da amaçlanmıştır. Taguchi yöntemi kullanılarak her deney için tahminler yapılmış ve optimum oran ve seviyeler belirlenmiştir. Modifiye bitüm ve modifiye bitümlü sıcak karışımların incelenen özelliklerinin hepsinin bir arada iyileştirilebilmesi için MRPI yöntemi kullanılarak deneyler bir arada değerlendirilmiştir. Bu sayede tüm deney sonuçlarına en olumlu etkiyi sağlayacak optimum seviyeler belirlenmesi amaçlanmıştır. Ayrıca geçirimli elektron mikroskobu, taramalı elektron mikroskobu, Fourier dönüşümlü kızılötesi

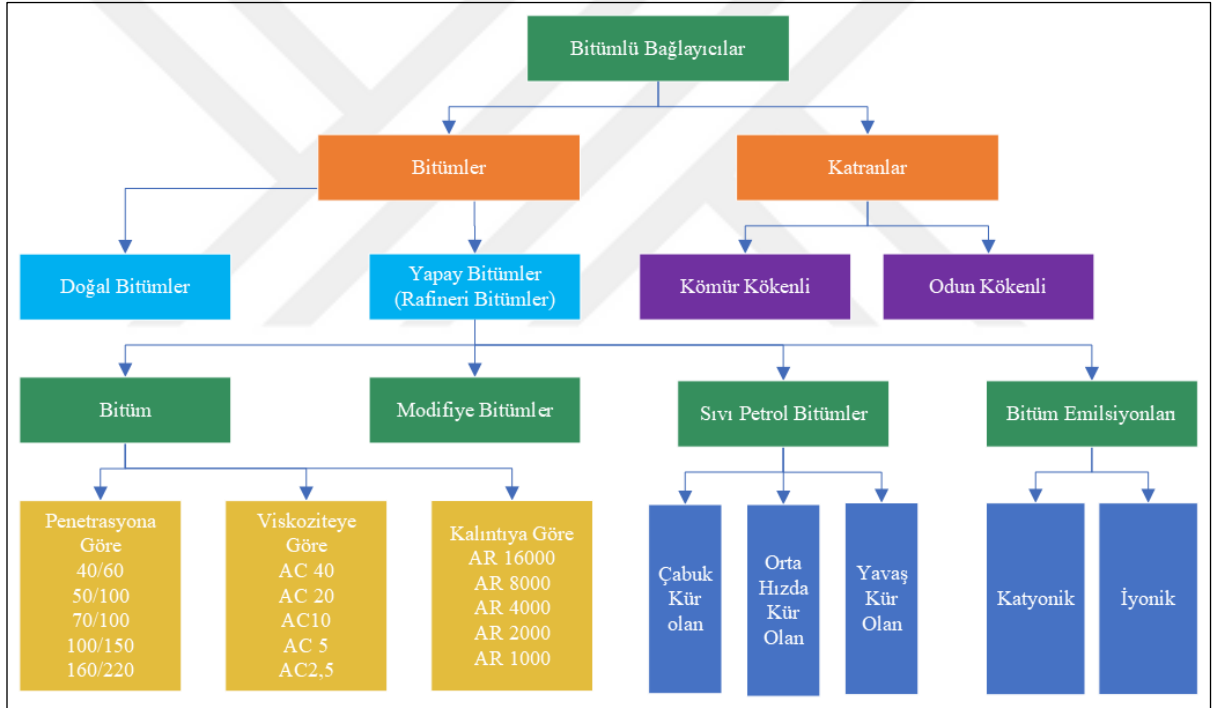
spektroskopisi kullanılarak modifiye bitümlerin kimyasal ve yapısal özelliklerinin belirlenmesi amaçlanmıştır.



KURAMSAL TEMELLER

Bitümlü Bağlayıcılar

Bitümlü bağlayıcılar hidrokarbonlardan oluşan genellikle yüksek viskoziteye sahip yüksek sıcaklıklarda sıvı, düşük sıcaklıklarda katı halde bulunan uçucu olmayan malzemelerdir. Genel olarak bitümler ve katranlar olarak sınıflandırılmaktadır (Anonymous, 2014). Bitümlü bağlayıcıların sınıflandırılması Şekil 1’de verilmiştir. Bitümler doğada bulunabildiği gibi petrol rafinerilerinde de elde edilebilmektedir. Yapay bitümler üretildikleri ham petrolün özelliğine ve üretim işlemlerine göre birbirinden farklı özellikler gösterebilmektedir (Paliukaite *et al.* 2014).



Şekil 1. Bitümlü bağlayıcıların sınıflandırılması

Bitümlü Sıcak Karışım Asfalt

Bitümlü sıcak karışımlar; belirli bir sıcaklıkta yeterli sağlamlığa sahip, şekli ve biçimi uygun olan cilalanma direnci yüksek olan belirli bir gradasyona sahip agregalar ile bitümün homojen olarak karıştırılması ile elde edilen karışımlardır. Karayolu üstyapısı trafik yoğunluğu göz önünde bulundurularak düşük trafik yoğunluğuna sahip yollarda sathi kaplama olarak tasarlanırken, otoyollar, devlet yolları gibi yüksek trafik yoğunluğuna sahip yollarda bitümlü sıcak karışım asfalt olarak tasarlanmaktadır (Anonymous, 2013). Bitümlü sıcak karışım asfaltlar (BSK); belirli bir gradasyona sahip iri agrega, ince agrega ve filler malzemelerin belirli

bir oranda bitüm ile asfalt plentlerinde yüksek derecede sıcaklıklarda karıştırılması ile elde edilirler. BSK üretiminde uygulama yapılacak bölgenin iklim şartlarına göre bitümün penetrasyon sınıfı seçilir. Sıcak iklim bölgelerinde düşük penetrasyonlu bitümler kullanılırken soğuk iklim bölgelerinde yüksek penetrasyonlu bitümler kullanılmaktadır. Karayolu üst yapıları yeterli stabilite, durabilite, geçirimsizlik, işlenebilirlik ve kayma direncine sahip olacak şekilde tasarlanarak imal edilmelidir (Tunç, 2002).

Bitümlü sıcak karışımlarda stabilite

Bitümlü sıcak karışım ile oluşturulan kaplamaların, trafik yüklerine maruz kalması ile oluşabilecek ötelenme ve tekerlek izleri gibi deformasyonlara karşı gösterdiği dirence stabilite denir. Bitümlü sıcak karışımın stabilitesi düşük olduğunda trafik yüklerine maruz kalan kaplamalarda çökme ve ondülasyon gibi kalıcı deformasyonlar olmaktadır. Stabilite çok yüksek olduğunda ise kaplamanın fleksibilite (esneklik) özelliği düşeceği için trafik yükünün oluşturduğu gerilmeler karşısında çatllaklar oluşacak ve bu da bozulmalara neden olacaktır (Tunç, 2004).

Bitümlü sıcak karışımlarda rijitlik

Bitümlü sıcak karışımlar termoplastik bir malzeme olduğu için trafik yükleri ve hava koşulları altında viskoelastik davranış göstermektedir. Bu sebeple bitümlü sıcak karışımların mekanik özelliklerinin belirlenmesi için rijitlik modülü ısı ve yükleme hızına bağlı olarak kullanılmaktadır. Farklı yükleme hızı ve sıcaklıklarda kaplamada oluşan gerilme ve deformasyon arasındaki ilişki rijitliği göstermektedir. Rijitlik; yükleme hızı azaldıkça, sıcaklık ve bitümün penetrasyonu arttıkça azalır (Tunç, 2004).

Bitümlü sıcak karışımlarda dayanıklılık

Bitümlü sıcak karışım kaplamalarında trafik ve çevre şartlarından dolayı bitümde yaşlanma, agregaların kırılması ve agregaları saran bitüm filminin soyulması gibi etkiler oluşabilmektedir. Bitümlü sıcak karışımların bu etkilere gösterdiği direnç dayanıklılık olarak adlandırılır. Karışımın dayanıklı olabilmesi için; düşük boşluk oranına sahip olması, yoğun gradasyonlu olması ve bitüm oranının yüksek olması gereklidir (Tunç, 2004).

Bitümlü sıcak karışımlarda yorulma mukavemeti

Bitümlü sıcak karışımlarda, kaplamaya etki eden tekrarlı trafik yükleri altında kalıcı deformasyon meydana gelmeden eğilme yapma yeteneğine yorulma mukavemeti denir. Rijitliğin, yoğunluğun ve penetrasyonun azalması yorulma mukavemetini düşürmektedir (Tunç, 2004).

Bitümlü sıcak karışımlarda fleksibilite

Bitümlü sıcak karışımlarda fleksibilite, kaplamanın kalıcı bir deformasyon oluşmadan eğilebilme ve uzun süre boyunca trafik yüklerine maruz kalan temelde oluşabilecek farklı oturmalara karşı uyum gösterebilme yeteneğidir. Fleksibilite kaplamadaki bitüm miktarının artması durumunda veya yoğun gradasyon yerine açık gradasyon olması durumunda artmaktadır. Bundan dolayı fleksibilitenin artması stabilitenin azalmasına sebep olmaktadır.

Bitümlü sıcak karışımlarda kayma direnci

Bitümlü sıcak karışımlarda kayma direnci, kaplama ile tekerlek arasında oluşan sürtünme kuvveti ile gösterdiği dirençtir. Karışımın asfalt miktarı arttıkça ise ya da agregaların cilalanma direnci ve pürüzlülüğü azaldıkça kayma direnci de azalmaktadır.

Bitümlü sıcak karışımlarda geçirimsizlik

Bitümlü sıcak karışımlarda hava veya suyun kaplamanın içine girmesine verdiği dirençtir. Kaplamanın iyi sıkıştırılması geçirimsizliği artırmaktadır. Ayrıca bitüm oranının artması ve yoğunluğun artması geçirimsizliği artırmaktadır. Geçirimsizlik düştükçe kaplama içine giren hava veya su; agregaların kırılması, bitümün yaşlanması, soyulma mukavemetinin azalması gibi etkenler ile çeşitli bozulmalara sebep olmaktadır.

Bitümlü sıcak karışımlarda işlenebilirlik

Bitümlü sıcak karışımlarda; karışımın temel üzerine serimi ve temel üzerine serilen karışımın sıkıştırılması esnasında göstermiş olduğu kolaylığın veya zorluğun ölçüsüne işlenebilirlik denir. Tasarıma uygun bir şekilde esnek kaplama yapılabilmesi için işlenebilirlik oldukça önemlidir. İşlenebilirliği artırmak için; kaba agrega miktarı, dane boyutu, filler miktarı azaltılabilir veya yüksek penetrasyona sahip bitüm kullanılabilir.

Bitümün reolojik özellikleri

Reoloji deformasyon ve akma karakteristiklerini sadece yüke bağlı olarak değil aynı zamanda yükün süresine de bağlı olarak inceleyen bilimdir (Tunç, 2004). Bitüm visko-elastik ve termo-plastik özellikler gösteren reolojik bir malzemedir. Bitümlü sıcak karışım kaplamaları, trafik yüklerinin büyüklüğü, yüklenme süresi ve sıcaklığa göre elastik, elasto-plastik, plastik ve viskoz özellikler göstermektedir. Aynı trafik şartlarında bir kaplama, sıcak havalarda viskoz özellikler gösterirken, soğuk havalarda elastik özellik gösterebilir. Aynı sıcaklıklarda bir kaplama, trafiğin hızlı olduğu durumlarda (yükleme hızı yüksek) elastik, yavaş olduğu durumlarda (yükleme hızı düşük) ise viskoz özellikler gösterebilmektedir. Bu

davranışlardan dolayı yüklenme hızı ve sıcaklık parametreleri BSK kaplamalarının rijitliğine büyük bir etki etmektedir.

Sıcak iklime sahip bölgelerde genellikle düşük penetrasyon değerine sahip bitümler kullanılmaktadır. Yüksek penetrasyon değerine sahip bitüm kullanılan sıcak iklim bölgelerinde bitüm, sıcaklığın etkisi ile viskoz bir davranış göstererek akmaya başlamaktadır. Bu davranış tabakalar arasındaki sürtünme kuvvetini azaltarak stabilitenin düşmesine neden olur. Stabilitenin düşmesi ve bitümün viskoz davranışı, trafik yükleri altında kalıcı deformasyonlar oluşturarak tekerlek izi veya oluklanma olarak adlandırılan yol bozulmalarına sebep olabilmektedir. Aynı durum ağır taşıtların düşük hızda seyrettiği ya da dur-kalk yaptığı yol kaplamalarında da geçerlidir (Kök *et al.* 2009).

Soğuk iklime sahip bölgelerde genellikle yüksek penetrasyon değerine sahip bitümler kullanılmaktadır. Soğuk havalarda bitüm elastik bir katı gibi davranarak trafik yükleri altında geçici deformasyonlar oluşmasına neden olur. Kaplamanın taşıma kapasitesinden fazla bir yükün gelmesi durumunda ise kırılma meydana gelir. Ayrıca düşük sıcaklıkta bitümde oluşan iç gerilmelerden dolayı termal çatlaklar (düşük sıcaklık çatlakları) oluşmaktadır (Tunç, 2004; Sayın and Tanyıldızı, 2006; Kök *et al.* 2009).

Bitümlü Sıcak Karışımlarda Meydana Gelen Bozulmalar

BSK kaplamaya sahip yollar trafiğe açıldıktan sonra; trafik, iklim, çevre, tasarım hatası ve uygulama hatası gibi etkilerle bozulmalara uğrayabilmektedir. Bu bozulmalar kalıcı deformasyon, ayrışma ve çatlama olarak sınıflandırılabilir.

BSK kaplamalarında cilalı ve yuvarlak agrega kullanımı, danelerin kenetlenme direncinin düşük olması, yüksek sıcaklıklar, bitüm oranının fazla olması, penetrasyon değerinin çok yüksek olması, yeterli sıkıştırmanın sağlanamaması ve gradasyonun sürekli olmaması düşük kayma mukavemetine neden olmaktadır. Agregaların toplam yüzey alanının az olması, gradasyonda süreksizlik, bitüm içeriğinin az olması, karışım/sıkıştırma sıcaklıklarının düşük olması, boşluk oranının yüksek olması düşük kütle karışım viskozluğuna neden olmaktadır. Araç ağırlığının yüksek olması, araç hızlarının düşük olması ve yanal desteklerin az olması agregaların düşük yer değiştirme direncine neden olmaktadır. Bu etkilerin her biri kaplamalarda kalıcı deformasyon oluşmasına neden olmaktadır. Kalıcı deformasyon bozulmaları; tekerlek izleri, düzensiz yüzey bozuklukları, oturmalar, ondülasyonlar, kabarmalar olarak sınıflandırılabilirler.

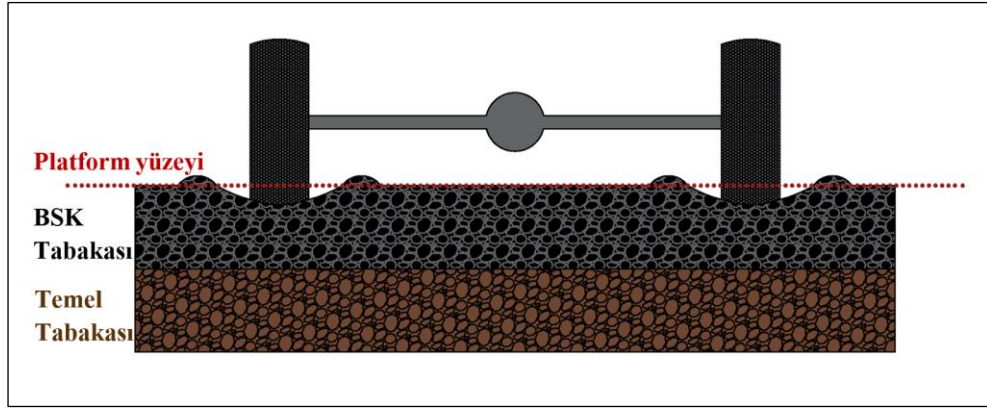
BSK kaplamalarında bitümün adezyonunun az olması, bitüm filminin kalınlığının az olması, agregaların kirli olması, yüksek geçirgenlik ve boşluk oranının fazla olması gibi

nedenler düşük soyulma mukavemetine neden olmaktadır. Soyulma mukavemetinin düşük, aşınma tabakası kalınlığının az, tekerrürlü yüklerin fazla olması ayrışmalara neden olmaktadır. Ayrışma bozulmaları; çukurlar, sökülmeler ve kaygan yüzeyler olarak sınıflandırılabilirler.

BSK kaplamalarında gün içerisinde sıcaklık farklarının yüksek olması, bitüm yapısındaki değişikliklerin (oksidasyon, sineris, polimerleşme, tiksotropi) yüksek olması ve bitümün ya da bileşenlerinin agregalar tarafından fazla emilmesi yüksek büzülme neden olmaktadır. Bitüm miktarının düşük olması, bitümün düşük penetrasyona sahip olması, bitümün çok fazla yaşlanması, agreganın çeşitli etkilerle (digradasyon ve donma çözülme) parçalanması, boşluk oranının çok düşük olması, agregaların kenetlenme özelliğinin çok fazla olması çok düşük fleksibiliteye neden olmaktadır. Tabakalar arasındaki bağın yetersiz olması, tabakalar arasındaki film kalınlığının çok fazla olması, kaplama kalınlığının az olması, yanal desteğin az olması, tabakaların çekme ve kayma mukavemetlerinin düşük olması tabakalar arasında kaymaya neden olmaktadır. Bu etkilerin her biri kaplamalarda çatlama oluşmasına neden olmaktadır. Çatlamlar; trafik etkisiyle stabilite, yorulma ve yansıma çatlakları olarak, iklimsel ve çevresel etkileriyle de büzülme ve düşük sıcaklık çatlakları olarak sınıflandırılabilirler (Tunç, 2001, 2002, 2004).

Tekerlek izleri

BSK kaplamalarında yetersiz stabilite, tekrarlı yüksek trafik yükleri, düşük yükleme hızı, bitümün penetrasyonunun yüksek olması, dere agregası (cılalı ve yuvarlak) kullanımı, yeterli sıkışmanın sağlanamaması gibi etkenler, kaplamada tekerleklerin en çok yük uyguladığı kısımlarda sıkışmaya neden olur. Bu sıkışma genellikle yetersiz stabilite veya boşluk oranının yüksek olması gibi sebeplerden kaynaklanmaktadır. Sıkışan kısımların yan taraflarının kabarak yükselmesi ise bitümün viskoz davranışı ve yuvarlak agregaların kullanımı gibi nedenlerle kayma gerilmelerinin karşılanamamasından kaynaklanmaktadır. Sıkışan ve yükselen kısımlar oluşturdukları görüntü itibari ile oluklanma, kanallanma veya tekerlek izi olarak isimlendirilmektedir. Bu tür bozulmalar özellikle trafik güvenliğini ve sürüş emniyetini tehdit etmektedirler. Ayrıca bu kısımlara gelen su drene olmadığı için kaplamaya etki ederek soyulmalara ve oksidasyonun hızlanmasına sebep olarak başka tür bozulmalara da yol açmaktadır. Tekerlek izi oluşması çok fazla nedene bağlanabilmektedir. Kaplamanın temel tabakalarının taşıma gücü zayıf olması durumunda trafik yüklerinden dolayı bir veya birkaç tabaka sıkışma-oturma şeklinde deformasyona uğrayarak tekerlek izi bozulmasını meydana getirebilmektedir. Bu tür tekerlek izlerinde kabarma oluşmamaktadır ve yapısal tekerlek izi olarak tanımlanmaktadır (Tunç, 2004; Yılmaz, 2013). Yapısal tekerlek izi bozulmasının bir görseli oluşturularak Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 4. Akma tekerlek izi

Ondülasyonlar

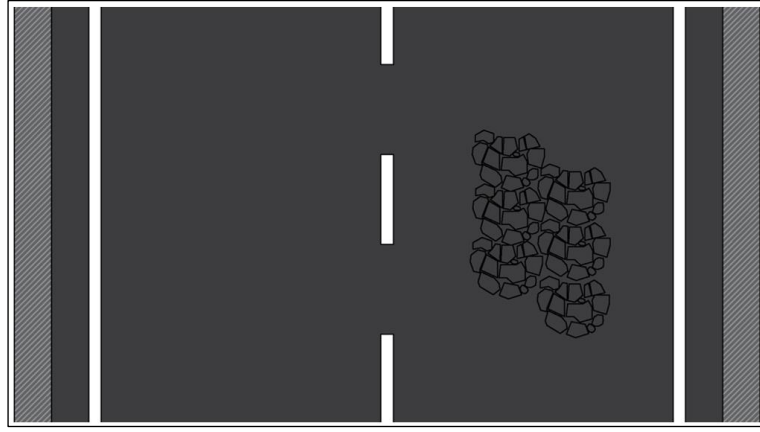
Düşük stabiliteye sahip kaplamalar, aşınma tabakasının yetersiz olması, düşük viskoziteli bitüm kullanımı, dur-kalk hareketleri gibi etkiler ile kaplama yüzeyinde dalgalanmalar oluşmaktadır. Bu tür bozulmalara ondülasyon adı verilmektedir. Bu tip deformasyonlar genellikle bölgesel olduğu için onarım yapılması kolaydır (Tunç, 2004).

Kabarmalar

Yol zemininin veya temel tabakalarının su ile temas etmesi sonucunda içeriğinde bulunan kil, montmorillenit gibi malzemelerin şişmesi ile ve don derinliğinin kaplama kalınlığı ile aynı ya da fazla olduğu durumlarda suyun donarak zemini yükseltmesi sonucunda kabarmalar meydana gelmektedir (Tunç, 2002). Don ile oluşan genleşmeleri önlemek için üstyapı tabakaları altındaki suyun drenajının etkili yapılması çok önemlidir. Kabarmaya karşı kaplamaları koruma amacıyla temel tabakası altına su ve nem yalıtım tabakaları uygulanmaktadır. Ayrıca etkin bir drenaj oluşturmak için granüler malzeme ile yol zemininin değiştirilmesi yapılan uygulamalar arasındadır (Tunç, 2004).

Timsah sırtı çatlamlar

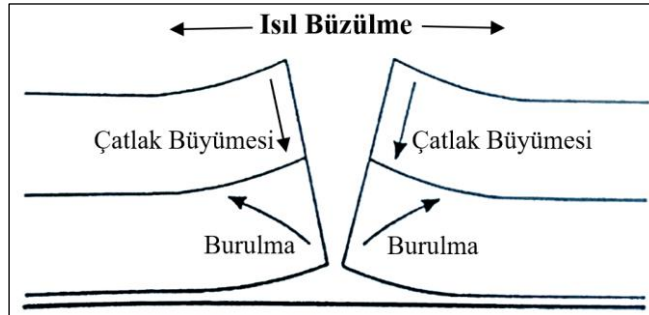
Kaplamalarda su drenajının iyi yapılamaması halinde zeminin veya üstyapı tabakalarının suya doygunlukları artmaktadır ve bu taşıma gücünü düşmesine neden olmaktadır. Taşıma gücünün düşmesiyle zamanla oturmalar oluşarak kaplama yüzeyinde birbirine temas eden bal peteği ya da timsah sırtına benzeyen çatlaklar grubu meydana gelir. Bu tip bozulmalara görüntülerinden dolayı timsah sırtı çatlamlar denir. Şekil 5'te timsah sırtı çatlama bozulmasının bir görseli oluşturularak verilmiştir. Yorulma çatlakları olarak da isimlendirilmektedirler.



Şekil 5. Timsah sırtı çatlama

Düşük sıcaklık çatlakları

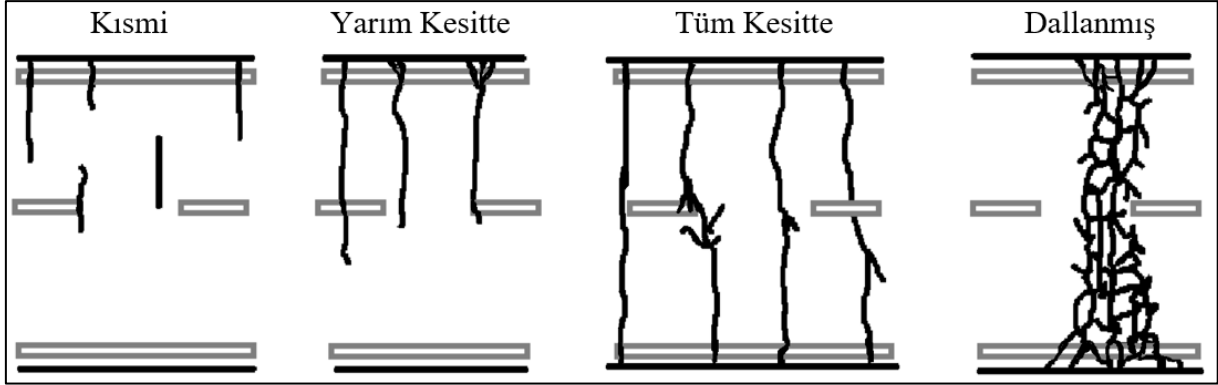
Büzülme çatlakları düzensiz aralıklara ve büyük boyutlara sahip çatlaklardır. Düşük sıcaklık çatlakları ise yolun enine doğrultuda düzenli aralıklara sahip çatlaklardır. Bu çatlaklar soğuyan havalar ile kaplamanın büzülmesiyle oluşmaktadır. Düşük sıcaklığın etkisi ile büzülme çalışan BSK kaplamasının alt tarafında sürtünmeden kaynaklı gerilmeler meydana gelerek çatlamalara sebep olmaktadır. Bu çatlaklar bazı durumlarda kaplama yüzeyinde oluşurken bazı durumlarda ise kaplamanın tamamında oluşmaktadır. Kaplamanın yüzeyinde oluşan çatlaklar bitümün düşük sıcaklık ile büzülerek oluşturduğu çekme gerilmelerinden kaynaklanmaktadır. Don etkisiyle zeminin kabarmasından kaynaklı oluşan çekme gerilmeleri ise kaplamanın tamamında çatlaklar oluşturmaktadır. Bitümün penetrasyonunun düşük ve penetrasyon indeksinin -2'ye eşit ya da küçük olması düşük ısı çatlakları oluşmasının ana sebeplerindendir. Bunlar haricinde düşük sıcaklık çatlaklarının oluşmasında ve büyümesinde; yaşlanma, kaplama kalınlığının az olması ve zeminin ısıya karşı duyarlılığı fazla olması rol oynamaktadır. Şekil 6'da düşük sıcaklık çatlaklarının büyüme mekanizması verilmiştir (Tunç, 2004).



Şekil 6. Düşük sıcaklık çatlaklarının büyümesi

Kaplama yüzeyinde oluşan çatlaklar soğuk havalarda kaplamanın üst kısmında aşırı ısı büzülme alt kısmında ise burulmaya neden olmaktadır. Yüksek trafik yükleri kaplama yüzeyindeki düşük sıcaklık çatlaklarının ilerleyerek derinleşmesine ve çatlak boyunca dallara

ayrılmasına sebep olmaktadır. Düşük sıcaklık çatlakları, kısmi, yarım kesitte, tüm kesitte ve çatlak uzunluğunca dallanmış olarak meydana gelmektedir. Çatlaklar arası mesafe yaklaşık olarak eşittir ve genellikle 6-9 metre aralığındadır. Şekil 7’de düşük sıcaklık çatlaklarının tipleri verilmiştir.



Şekil 7. Düşük sıcaklık çatlak tipleri

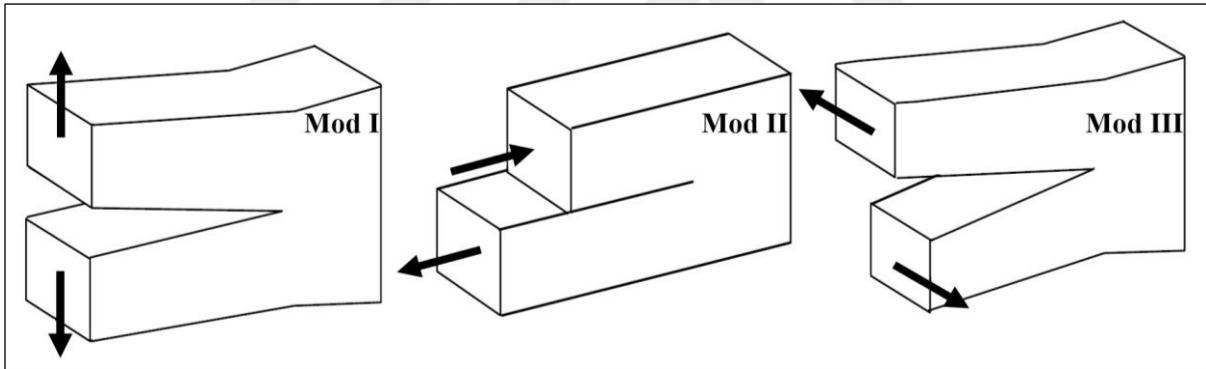
Modifiye Edilmiş Bitüm ve Bitümlü Karışımlar

Bitüme ve bitümlü sıcak karışımlara çeşitli katkı maddeleri ilave edilerek oluşturulan katkıli bitüme motife edilmiş bitüm, bu bitüm ile hazırlanan karışıma ise motife edilmiş bitümlü karışım denmektedir. Modifiye edilmiş bitümlü karışımlar ile kaplamanın performansının artırılması hedeflenmektedir. Örneğin SBS (stiren bütadien stiren) ile modifiye edilen bitümlü karışımların; kalıcı deformasyon direncinin arttığı gözlemlenmiştir. Yağ ile modifiye edildiğinde ise bitümün bağlayıcılık özelliği ve viskozitesi artmaktadır. Esnek kaplamalarda istenmeyen durumların önüne geçilmesi için modifiye bitüm ve bitümlü karışımlar son yıllarda sıkça kullanılmaya başlanmıştır. Kullanılacak katkının özelliklerine, cinsine ve miktarına göre modifikasyonlar farklı sonuçlar vermektedir (Tunç, 2004)

Kırılma Mekanik Prensipileri ile Bitümlü Sıcak Karışımların Çatlak İlerleyişine Karşı Dayanımlarının Belirlenmesi

Bitümlü kaplamalarda oluşan çatlak tipi bozulmalardan dolayı kırılma mekanik yaklaşımının BSK'lara uygulanması araştırılmaktadır. Kırılma tipleri sürüntü, sünek ve gevrek kırılma olarak üçe ayrılmaktadır. Sürünme kırılması; bir malzemenin sabit yük ve gerilmeler altında sürekli ve yavaş bir şekilde akma olayının gerçekleşmesi ile oluşan deformasyon sonucunda kırılmasıdır. Sünek kırılma tipi bir malzemenin yüksek miktarlarda kalıcı deformasyonlara uğraması sonucunda oluşan kırılmadır. Gevrek kırılma tipi ise kalıcı deformasyon oluşmadan gerçekleşen kırılmadır. Kırılma tipleri malzemenin özelliklerine, sıcaklığa, yükleme ve deformasyon hızlarına bağlıdır. Kırılma olayı, çatlağın oluşumu ve çatlağın ilerlemesi şeklinde iki aşamadan oluşmaktadır. Kırılma mekanik ise malzemelerin

çatlaklarını, çatlakların yayılımını ve diğer kusurların (çentik, boşluk) etkisiyle oluşan davranışları inceleyen bilim dalıdır (Alyamaç, 2008). Kırılma mekaniği ilk olarak Griffith tarafından yapılan araştırmalara dayanmaktadır. Griffith bir malzemenin potansiyel enerjisinin yüzey enerjisine oranı arttıkça çatlak boyunun da artacağını belirtmiştir. Griffith teoremi ile gevrek kırılma tipi gösteren malzemelerde çatlağın yayılması için gerekli gerilme yoğunluğu belirlenmektedir. Ancak bu teorem çatlağın ilerlemesinden önceki ya da sonraki davranışını açıklamamaktadır. Irwin ise bu eksikliklerin giderilmesi ve teoremin daha genişletilmesi için çalışmalar yapmıştır. Çatlak ucunda oluşan gerilme yoğunluğunu ve kalıcı deformasyonları dikkate alarak K (Gerilme şiddet çarpanını) faktörünü tanımlamıştır. Yaptığı çalışmalar sonucunda teorem gevrek, yarı gevrek ve sünek malzemelere de uygulanabilecek şekilde genişletilmiştir. Malzemenin yüklenme durumuna göre üç genel kırılma mod tanımlanmıştır. Mod I çekme, Mod II kesme ve Mod III burulma durumlarını ifade etmektedir (Marasteanu *et al.* 2004; Yılmaz, 2013). Kırılma modları Şekil 8’de verilmiştir. K faktörü malzemenin geometrisine ve yüklenme durumuna bağlı bir değişkendir. Kırılma tokluğu ise bir malzemenin çatlak ilerlemesine karşı gösterdiği direncin bir ifadesidir. K faktörü kritik değere ulaştığında (K_c) kırılma tokluğu değerini vermektedir.



Şekil 8. Kırılma modları

$$K_I = \sigma\sqrt{\pi a}$$

$$K_{II} = \tau\sqrt{\pi a}$$

$$K_{III} = \tau\sqrt{\pi a}$$

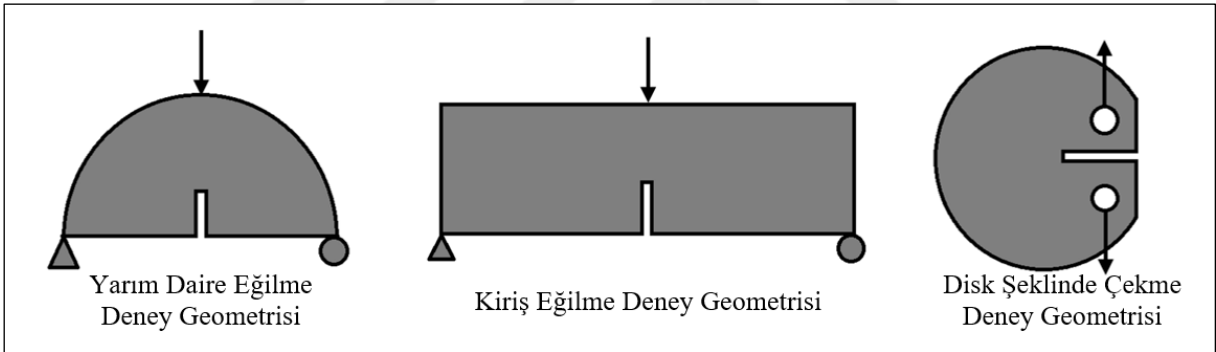
Modlara göre K faktörleri yukarıda verilen denklemler ile hesap edilmektedir. Burada malzemeye uygulanan çekme gerilmesi σ ile, kesme gerilmesi ise τ ile, çatlak uzunluğunu ise a ile gösterilmektedir.

Bitümlü sıcak karşım kaplamalar trafik yükleri ve sıcaklık değişimlerinin etkisi ile oluşan çatlaklar Mod I tipi kırılmalara sebep olmaktadır. Çatlak yüzeylerinin zıt taraflara doğru paralel bir şekilde kayması sonucu Mod II tipi kırılmalar oluşmaktadır. Çatlak yüzeylerinin

birbirine dik eksenler doğrultusunda kayması sonucu burulma ile Mod III tipi kırılmalar oluşmaktadır. Mod I tipi kırılma için kırılma tokluğu (kritik gerilme şiddeti faktörü) aşağıda verilen denklem ile hesap edilmektedir.

$$K_{IC} = \sigma_N \sqrt{\pi a} f(a/W)$$

Burada K_{IC} kırılma tokluğunu, σ çekme gerilmesini, a çatlak uzunluğunu ve $f(a/W)$ ise malzemenin boyutlarına bağlı olan geometrik faktörü ifade etmektedir. Lineer elastik kırılma mekaniği BSK numunelerine; dinamik çatlak ilerleme, statik çatlak ilerleme ve sabit deformasyon hızlı olmak üzere üç farklı yöntem ile uygulanmaktadır. Dinamik çatlak ilerlemesi yönteminde çentikli numuneye belirli periyotlarla yük verilmektedir. Sabit deformasyon hızlı yöntemde çentikli numunenin deformasyon hızı sabit kalacak şekilde yük verilmektedir. Statik çatlak ilerleme yönteminde ise çentikli numuneye çatlak ilerleme hızı sabit kalacak şekilde yük verilmektedir. Dinamik ve statik çatlak ilerleme yönteminde çatlağın ilerlemesi incelenmektedir. Kırılmaya karşı dayanımı incelemek için sabit deformasyon hızlı yöntem kullanılmaktadır (Yılmaz, 2013). Bu yöntem kullanılarak yarım daire eğilme, kiriş eğilme ve disk şeklinde çekme deneyleri uygulanmaktadır. Deney geometrileri Şekil 9'da verilmiştir.



Şekil 9. Sabit deformasyon hızlı yöntem deneyleri

Literatür Özeti

Esnek kaplamaların en temel bozulma şekilleri çatlak oluşumları olarak söylenebilir (Sikdar *et al.* 1999). Artan trafik yükü, çevresel koşullar, nem içeriği, alt zemin mukavemeti, kullanılan malzemelerin kalitesi ve tasarım hususları zaman içerisinde kaplamanın davranışını ve performansını etkilemektedir (Salama *et al.* 2006). Bitümlü Sıcak Karışımdaki yüzey durumu ve hava boşluklarının artması, yaşlanma oranının artmasına neden olmaktadır (Sangiorgi *et al.* 2017). Üstyapıda meydana gelen tekerlek izlerinin, termal çatlakların ve yorulma çatlaklarının önlenmesi için bitüm, farklı katkı maddeleriyle yıllardır modifiye edilmektedir (Yıldırım, 2007). Grafen, kimyasal yapısı ve mekanik özellikleri sayesinde daha dayanıklı karışımlar elde etmeye yardımcı olabilecek bir modifiye edici olarak kabul

edilmektedir. Grafen pulları bitümün yapısında bulunan kimyasal gruplar ile reaksiyona girerek kararlı yapıda nanokompozitler oluşturabilmektedirler. Ayrıca bazı araştırmacılar bitüm kullanarak grafen elde etmenin mümkün olduğunu ortaya koymuşlardır (Cheng *et al.* 2011; Liu *et al.* 2014). Grafen pullarının işlenebilirlik özelliklerini iyileştirici bir etkiye sahip olduğu söylenebilmektedir (Sedaghat *et al.* 2014). Ancak, modifiye bitüm üretmek için katkı malzemesi olarak kullanımının hala nispeten yeni olduğu göz önüne alındığında, grafen ile modifiye edilmiş asfalt materyalleri çalışmaları hala oldukça sınırlıdır (Lu *et al.* 2015). Bitkisel yağlar son zamanlarda sıklıkla modifiye bitüm elde etmek için kullanılmış ve bitümün çeşitli özelliklerini iyileştirdiği ifade edilmiştir (Serin and Demirezer, 2021; Çolak *et al.* 2023). Ancak kenevir tohumu yağı ile yapılan çalışmalar çok sınırlıdır. Grafen nanoplatelet'in ve kenevir tohumu yağının asfalt bağlayıcıların mekanik ve reolojik özellikleri üzerindeki gerçek etkisini analiz eden nispeten az sayıda araştırma vardır. Bu sebeple grafen, grafen oksit, grafen nanoplatelet, kenevir tohumu yağı ve bitkisel yağların kullanıldığı çalışmalar incelenerek bu bölümde ayrı ayrı verilmiştir.

Kırılma mekaniği kavramı, asfalt tabakasındaki kırılma modlarına göre çatlama mekanizmasının anlaşılmasına yardımcı olur (Baek, 2010). Kırılma mekaniği, çatlak düzlemi üzerindeki yükleme doğrultusuna göre üç modda tanımlar. Geçtiğimiz yıllarda, asfalt betonunun düşük sıcaklıkta çatlama direncini değerlendirmek için dolaylı çekme (IDT) testi, disk şeklinde kompakt gerilim (DCT) testi, yarım daire eğilme (SCB) deneyi, kiriş eğilme deneyi (SENB) gibi test metotları geliştirilmiştir. Numune hazırlama ve test etme açısından duyarlılık, basitlik, tekrarlanabilirlik ve tutarlılık gibi çeşitli avantajlar nedeniyle, SCB testi araştırmacılar tarafından artan bir ilgi görmüştür (Aliha *et al.* 2014; Xue *et al.* 2020; Bui and Saleh, 2021). SCB deneyi, düşük sıcaklıklarda bitümlü sıcak karışımlarda kırılma tokluğunu incelemek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Düşük sıcaklıklarda kırılma tokluğunun incelenmesi ile özellikle termal çatlamlar araştırılmaktadır (Braham *et al.* 2007; Li and Marasteanu, 2010b; Ozer *et al.* 2016). Bazı katkı maddeleri ile modifiye edilmiş bitümlü karışımlarda kırılma özelliklerinin belirlenmesi için SENB deneyi SCB deneyine göre daha geçerli bir çözüm olmaktadır. SENB deneyinin kullanılmasının en önemli etkenlerinden biri, kiriş numune boyutunun kırılma bölgesinin kuşatılmasını sağlamak için uygun hale getirilebilmesidir (Sudarsanan *et al.* 2019).

Grafen katkı maddesinin kullanıldığı çalışmalar

Aravind *et al.* (2018), çalışmasında %0,05, %0,1 ve %0,15 oranlarında grafen katkısı ile modifiye edilmiş bitümlü karışımların performans özellikleri araştırılmıştır. Penetrasyon deneyi sonuçlarına göre grafen katkısının eklenmesi penetrasyon değerlerinde düşüşe neden

olmuştur. Özellikle %0,15 grafen katkısının kullanılması penetrasyon değerini %50,85 oranında azaltmıştır. Yumuşama noktası deneylerinde ise grafen katkısının kullanım oranı arttıkça yumuşama noktası değerinde artış olmuştur. Süneklilik açısından değerlendirildiğinde ise sırasıyla %78,77, %81,72 ve %84,08 oranlarında azalma görülmüştür. Marshall deney sonuçları incelendiğinde grafen katkısı oranı arttıkça stabilite değerlerinde de artış olduğu görülmektedir. %0,05 katkı oranında %31,08 artış, %0,1 katkı oranında %45,52 ve %0,15 katkı oranında %60,78 artış olduğu belirlenmiştir. Akma miktarlarında ise %7 ile %16 arasında artış olmuştur. Çalışma sonucunda grafen katkısının bitümün performansını artırdığı ifa edilmiştir.

Moreno-Navarro *et al.* (2018), çalışmasında sırası ile %0.1, %0.5 ve %1 oranlarında grafeni bitüme ekleyerek modifiye bitüm elde etmiştir. Modifiye bitüm mekanik ve termal özellikler yönünden incelenmiştir. Grafen eklenmesi ile bitümün daha elastik hale geldiği ve yüksek sıcaklıklarda plastik deformasyonlara karşı dirençlerini artırmaya yardımcı olabileceği ifade edilmiştir. Termal özellikler açısından ise grafen eklenmesi ile bitümün daha hızlı ısıtılabilirdiği, daha yüksek sıcaklıklara ulaşabildiği ve ısının daha hızlı yayılmasını sağlayabildiği ifade edilmiştir. Araştırmacılar, optimum grafen oranının %0,5 ile %1 arasında olabileceğini ayrıca grafen oranının çok yüksek olması halinde bağlayıcının sertliğini artırarak kırılma hale getirebileceğini belirtmişlerdir.

Li *et al.* (2021), çalışmada modifiye edici olarak grafen kullanılmış ve farklı oranlarda grafen içeren modifiye bitümler hazırlanmıştır. Çalışmada fiziksel özellikler, yaşlanmayı indirgeyen karakterler ve reolojik özellikler incelenmiştir. Modifiye bitümlerin fourier dönüşümü kızılötesi spektroskopisi (FTIR) ve atomik kuvvet mikroskobu (atomic force microscopy, AFM) ile kimyasal yapıları belirlenmiştir. Çalışma sonuçlarına göre; grafen miktarının artması yumuşama noktasında ve viskozitede artış meydana getirmiştir. FTIR sonuçlarına göre grafen bitüm içerisinde sadece fiziksel olarak karışım sağlamıştır ve bitüm ile herhangi bir reaksiyona girmemiştir. Grafen katılması ile bitümün yaşlanması büyük ölçüde önlenmiş olduğu ifade edilmiştir.

Yang *et al.* (2019), çalışmada karbon nanotüpler ve grafen katkı maddeleri ile bitümü modifiye ederek bitümleri reolojik ve mikro-yapısal açıdan incelemiştir. Modifiye bitüm 170°C sıcaklıkta dakikada 5000 devir ile 30 dakika karıştırılarak hazırlanmıştır. Grafen katkı maddesinin eklenmesi tekerlek izi direncini ve elastik geri dönme miktarını artırdığı bulunmuştur. Çalışmada optimum grafen oranı %1 olarak belirlenmiştir. Ayrıca daha yüksek oranlarda grafen kullanımının hem düşük sıcaklık performansını azaltacağı hem de bitümle grafen arasındaki bağ gücünün azalacağı ifade edilmiştir.

Nazki *et al.* (2020), grafen katkı malzemesi kullanarak bitümün reolojik ve termal özelliklerini araştırmışlardır. Çalışmada iki farklı viskozite değerine sahip bitüme ağırlıkça %0,5, %1, %1,5 ve %2 oranında grafen eklenmiştir. Grafen katkısı bitümün ısı iletkenliğini %80'e kadar artırmıştır. Çalışmada optimum bitüm oranı %1 ile %1,5 arasında bulunmuştur. Saf bitüme kıyasla grafen katkılı bitümün viskozite değeri artmıştır. En büyük artış %1 seviyesinde olduğu görülmüştür. Ayrıca grafen eklenmesi yumuşama noktasını her seviyede benzer miktarda artırmıştır.

Yang *et al.* (2020), bitüme ağırlıkça %2, %4, %6, %8 ve %10 oranlarında grafen ekleyerek modifiye bitüm elde etmişlerdir. Modifiye bitümün hazırlanmasında karıştırma süresi %10 grafen katkısı hariç her seviyede 20 dakika olarak alınmış ve %10 grafen ilavesi olan karışım için 40 dakika olarak alınmıştır. Çalışmada saf bitüme kıyasla grafen oranı arttıkça bitümün viskozitesinin arttığı belirlenmiştir. Ayrıca sıcaklık arttıkça grafenin viskoziteye etkisinin azaldığı belirtilmiştir. Çalışma sonuçlarına göre grafen modifiyeli bitüm yüksek sıcaklıklarda tekerlek izi direncini artırmıştır.

Şimşek (2021), yaptığı çalışmada 70/100 penetrasyon değerine sahip bitüme ağırlıkça %0,5, %1 ve %1,5 oranında grafen nanoplatelet katkısı ekleyerek modifiye bitüm elde etmiştir. Modifiye bitümün hazırlanması için karıştırma süresi 30, 45 ve 60 dakika olarak, karıştırma hızı ise dakikada 1000, 2000 ve 3000 devir olarak alınmıştır. Çalışmada Taguchi yöntemi ile penetrasyon deneyi için optimum seviyeler %0,5 grafen nanoplatelet katkısı, 3000 devir/dakika ve 30 dk karıştırma süresi olarak bulunmuştur. Çalışma sonuçlarına göre grafen nanoplatelet katkısının eklenmesi penetrasyon ve düktilite değerini azaltmış, yumuşama noktası değerini artırmıştır. Kısa süreli yaşlanma sonrasında ise optimum parametre seviyeleri penetrasyon deneyi için %0,5 grafen nanoplatelet katkısı, 1000 devir/dakika karıştırma hızı, 30 dakika karıştırma süresi olarak belirlenmiştir. Ayrıca grafen nanoplateletin kütle kaybını %1 oranına kadar artırdığı, %1,5 oranında ise azalttığı belirlenmiştir. Yumuşama noktası sonuçlarına göre ise optimum seviyeler %1,5 grafen nanoplatelet katkısı, 1000 devir/dakika karıştırma hızı ve 60 dakika karıştırma süresi olarak belirlenmiştir.

Wang *et al.* (2022), çalışmalarında saf ve SBS modifiyeli bitüme ağırlıkça %0,3, %0,65, %1, %1,5, %2,5, %5 ve %7 oranında grafen ekleyerek modifiye bitüm elde etmişlerdir. Çalışmada modifiye bitümün viskozite, uyumluluk, tekerlek izi direnci ve düşük sıcaklıklardaki çatlama direnci incelenmiştir. Çalışmada grafen katkısı iki bitüm türünde de viskoziteyi artırdığı, bitümün sertliğini ve elastik geri dönme performansını iyileştirdiği belirlenmiştir. DSR sonuçlarına göre ise tekerlek izi direncini artırdığı, yorulma çatlama direncini ise

olumsuz etkilediği belirlenmiştir. Yorulma çatlamasının ihmal edilebilir seviyede azaltıp, tekerlek izi direncini ise artıran katkı oranı %0,65 olarak belirlenmiştir.

He *et al.* (2022), yaptıkları çalışmada grafen, grafen oksit ve grafen nanoplatelet katkılı modifiye bitümlerin araştırıldığı çalışmaları incelemişlerdir. Grafen, grafen oksit ve grafen nanoplatelet katkılı modifiye bitümlerin yüksek sıcaklık performanslarının, yaşlanmaya karşı dirençlerinin ve tekerlek izi dirençlerinin saf bitüme kıyasla daha yüksek olduğu ifade edilmiştir. Ayrıca bazı araştırmacılara göre GNP katkısının düşük sıcaklık performansını azalttığı, bazı araştırmacılara göre ise artırdığı ifade edilmiştir. Yapılan çalışmalarda genellikle GNP kullanımının yumuşama noktası değerini artırdığı, penetrasyon değerini azalttığı ve elastik geri dönme değerini ise artırdığı belirtilmiştir.

Polo-Mendoza *et al.* (2023), çalışmalarında grafen oksit ve grafen nanoplatelet ile modifiye edilmiş bitümlerin araştırıldığı çeşitli çalışmaları incelemişlerdir. Çalışmada grafen nanoplatelet ve grafen oksit ile modifiye edilmiş bitümün saf bitüme kıyasla yaşlanmaya karşı direncinin, yorulma direncinin, tekerlek izi direncinin arttığını ve ısıya karşı duyarlılıklarının azaldığını ifade etmişlerdir. Ayrıca yapılan çalışmalarda yüksek performansa sahip bitüm üretmek için bu katkıların eklenebileceği vurgulanmıştır. Kimyasal ve mikroyapısal yapıların değerlendirilmesi için FTIR, XRD, TEM ve XPS gibi testlerinde yapılması önerilmiştir.

Grafen oksit (GO) katkı maddesinin kullanıldığı çalışmalar

Wang *et al.* (2019), çalışmalarında bitümlü kaplamaların hizmet süresini uzatmak amacıyla grafen oksit ve karbon nanotüpler (CNT) ile modifiye edilmiş bitümün yaşlanma direncini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda her iki katkı malzemesinin de bitümün yaşlanmaya karşı direncini artırdığı belirlenmiştir. Ayrıca çalışmada FTIR ile yaşlanma sırasında bitümde meydana gelen kimyasal değişiklikler gözlemlenmiştir.

Habib *et al.* (2015), çalışmalarında grafen oksit (GO) katkısı ile bitümü modifiye etmişlerdir. Çalışmada grafen oksit katkılı bitümün saf bitüme kıyasla elastik modülü artırdığı ve deformasyon direncini de artırmaya katkı sunabileceği ifade edilmiştir. Ayrıca grafen oksitin elastik, mekanik ve yüzey özellikleri sayesinde yol kaplamasında çökme riskini de azaltabileceği vurgulanmıştır. Termal iletkenliğinin yüksek olması nedeniyle yol kaplamalarında ısı tekniği ile kırılan bağların yeniden şekillendirilmesinde yardımcı olacağı belirtilmiştir.

Adnan *et al.* (2020), çalışmalarında 60/70 penetrasyon dereceli bitümü grafen oksit katkısı ile modifiye ederek bitümlü sıcak karışımın özelliklerini incelemişlerdir. Modifiye bitüm elde etmek için dakikada 4000 devir karıştırma hızı, 45 dakika karıştırma süresi ve 160°C

karıştırma sıcaklığı kullanılmıştır. Bitümlü sıcak karışımların kırılma direncini belirlemek amacıyla SCB deneyi yapılmıştır. Çalışmada 25,4 mm, 31,8 mm ve 38,1 mm çentik uzunluğuna sahip numuneler 20°C sıcaklıkta 0,5 mm/dak yükleme hızında kırılma deneyine tabi tutulmuştur. Çalışma sonuçlarına göre grafen oksitli modifiye bitüm saf bitüme kıyasla penetrasyonu azalttığı, yumuşama noktasını artırdığı, viskoziteyi artırdığı, sünekliliği azalttığı, kalıcı deformasyonu azalttığı, stabiliteyi artırdığı, kırılma direncini artırdığı bulunmuştur. Ayrıca tekerlek izi direncini, esneklik modülünü, çekme mukavemetini ve çatlama direncini artırdığı ifade edilmiştir.

Zhu *et al.* (2020), çalışmalarında ağırlıkça %0,05 oranında grafen oksit kullanarak bitümü modifiye etmişlerdir. Çalışma sonuçlarına göre grafen oksit kullanımı penetrasyon değerini ve kütle kaybını azaltmıştır. Yumuşama noktası değerini, sünekliliği ve viskoziteyi ise artırmıştır. Grafen oksit modifiyeli bitümlü sıcak karışımlarda agrega ve bitüm arasındaki kohezyonun ve nem direnci endeksinin artırdığı belirtilmiştir.

Jyothirmai *et al.* (2020), çalışmalarında 80/100 penetrasyona sahip bitüm grafen oksit ile modifiye edilmiştir. Çalışma sonucunda katkı eklenmesinin bitümün elastik kapasitesini artırdığı bulunmuştur. Grafen oksit katkısının %1 oranında eklenmesi penetrasyon değerini etkilemediği, %3 oranında ise azalttığı belirlenmiştir. Yumuşama noktası değerini artırdığı sünekliliği azalttığı ve bitümün performansını iyileştirdiği ifade edilmiştir. Ayrıca GO modifiyeli bitümün saf bitüme kıyasla yaşlanmaya karşı direncinin arttığı belirlenmiştir.

Zeng *et al.* (2020), çalışmalarında grafen oksit (GO) katkılı modifiye bitümün fiziksel, kimyasal ve morfolojik özelliklerini incelemişlerdir. Modifiye bitümün elde edilmesinde karıştırma sıcaklığı 150°C, karıştırma hızı dakikada 4000 devir ve karıştırma süresi 30 dakika olarak alınmıştır. Çalışma sonucunda saf bitüme kıyasla GO katkısının eklenmesi yumuşama noktası, viskozite ve stabilite değerlerini artırdığı, penetrasyon değerini azalttığı belirlenmiştir. Grafen oksit ile bitümün fiziksel olarak modifiye olduğu ve bu sebeple çatlama direncini iyileştiremeyeceği ifade edilmiştir. Optimum katkı oranı ise %0,05 ve %0,07 arasında belirlenmiştir. SEM görüntülerinde ise %0,5 oranında katkı kullanımının homojen bir yapı oluşturduğu ancak katkı oranı arttıkça topaklanma meydana geldiği görülmüştür.

Wang *et al.* (2020), çalışmalarında grafen oksit katkısı ile bitümü modifiye ederek bitümlü bağlayıcının termodinamik parametrelerini ve içsel iyileşme kapasitesini incelemişlerdir. Çalışma sonuçlarına göre GO katkısının eklenmesi yüzey serbest enerjisini artırdığı dolayısı ile yorulma çatlama direncini iyileştirdiği belirlenmiştir. GO katkısı termodinamik parametreleri ve içsel iyileşme kapasitesini, RTFOT ile kısa süreli yaşlandırma sonrasında artırdığı, ultraviyole yaşlandırma testi sonrasında ise azalttığı belirlenmiştir.

Adnan *et al.* (2022), grafen oksit katkısı ile modifiye edilmiş bitümün fiziksel ve mekanik özelliklerini incelemiştir. Çalışmada modifiye bitüm elde etmek için karıştırma sıcaklığı 160°C, karıştırma hızı 4000 devir/dakika ve karıştırma süresi 45 dakika olarak alınmıştır. Çalışma sonuçlarına göre katkı kullanımı penetrasyon değerini azaltmış, yumuşama noktası değerini artırmış, sünekliliği azaltmış, kütle kaybını azaltmış, viskoziteyi artırmış, sıcaklığa karşı duyarlılığı azaltmış, stabiliteyi artırmıştır. GO modifiyeli bitümlü sıcak karışımların performansının saf bitümlü karışımlara göre daha yüksek olduğu ifade edilmiştir. Marshall katsayısı (MQ) GO eklenmesi ile arttığı ve bu sayede kalıcı deformasyona karşı direncinin de arttığı ifade edilmiştir. En yüksek MQ oranı %4,5 bitüm ve %2 GO kullanımı ile yapılan deneylerde elde edilmiştir. GO kullanımının bitümlü sıcak karışımların dayanıklılığını ve tekerlek izine karşı direncini artırabileceği ifade edilmiştir. Çalışmada en iyi Marshall sonuçlarını elde etmek için optimum oranlar %1,8 GO ve %5,3 bitüm oranı olarak belirtilmiştir.

Qian *et al.* (2022), yaptıkları çalışmada grafen oksit katkısı ve iki farklı bio-yağ kullanarak 70 penetrasyon değerine sahip bitümü modifiye etmişlerdir. İki farklı bio-yağ ile oluşturulan bio-bitüme %0 ile %0,08 oranları arasında değişen miktarlarda GO katkısı eklenmiştir. Modifiye bitüm elde edilmesi için karıştırma sıcaklığı 160°C, karıştırma hızı 4500 devir/dakika, karıştırma süresi ise 30 dakika olarak alınmıştır. Çalışmada GO modifiyeli bio-bitümlerin fiziksel ve reolojik özellikleri incelenmiştir. GO katkısının eklenmesi her iki bio-bitümde de penetrasyon değerini düşürmüştür, süneklilik ve yumuşama noktası değerini ise artırmıştır. GO katkısının eklenmesi bitümlü sıcak karışımın yüksek sıcaklık performansını ve kalıcı deformasyon direncini artırmıştır ancak düşük sıcaklıkta çatlama direncine önemli bir katkı sunmamıştır. FTIR sonuçlarına göre GO katkısının yaşlanma performansını önemli ölçüde iyileştirdiği belirlenmiştir. Ayrıca GO katkısı arttıkça kütle kaybının azaldığı belirlenmiştir.

Grafen nanoplatelet (GNP) katkı maddesinin kullanıldığı çalışmalar

Marasteanu *et al.* (2016), çalışmada %3 ve %6 oranında grafen nanoplatelet kullanılarak bitüm modifiye edilmiştir. Kırılma özelliklerini belirlemek için yarım daire eğilme (SCB) testi uygulanmıştır. Ayrıca faz açısını elde etmek için dinamik kayma reometresi (DSR) ve akma sertliği ve sürünme sertliği eğrisinin eğimi (m değeri) için giriş eğme reometresi (BBR) testi yapılmıştır. Çalışma sonuçlarına göre grafen ile modifiye edilmiş bitümler saf bitümlere kıyasla düşük sıcaklıklarda daha iyi bir eğilme mukavemetine sahip olmuştur. Yarım daire eğilme testinde kırılma enerjisinin grafen ilavesi ile arttığı görülmüştür. Ayrıca GNP özelliklerinin karışımın özelliklerini etkilediği, GNP yapısında bulunan karbon içeriği arttıkça bitümün sertliğinin de arttığı ifade edilmiştir. DSR deney sonuçlarına göre GNP katkısının kullanılması

orta derece ve yüksek derece sıcaklıklarda bitümün kayma modülünü ve faz açısını fazla etkilemediği belirlenmiştir.

Moretti *et al.* (2021), çalışmalarında grafen nanoplatelet ile modifiye edilmiş bitümlü karışımın superplast ve SBS ile modifiye edilmiş bitümlü karışımları mekanik özellikler açısından incelenmiştir. Çalışma sonucunda yorulma eğrilerine göre GNP karışımlarının, modifiye edilmemiş asfalt betondan daha iyi ve hatta SBS ve Superplast ile modifiye edilmiş karışımlardan biraz daha iyi performansa sahip olduğunu vurgulamaktadır. Ayrıca GNP'lerin modifiye asfalt karışımının mekanik performansını ve dayanıklılığını iyileştirdiğini göstermiştir.

Brcic (2016), çalışmasında GNP kullanarak elde ettiği modifiye bitümün fiziksel ve mekanik özelliklerini incelemiştir. Çalışmada GNP oranları %1, %1,5 ve %2 olarak, karıştırma sıcaklığı 160°C, karıştırma süreleri 6, 15, 20, 26, 30 ve 40 dakika, karıştırma hızı ise 150 ve 300 devir/dakika, bitüm sınıfı ise 70/100 olarak alınmıştır. Çalışma sonuçlarına göre %2 GNP katkısının kullanılması bitümün kalıcı deformasyon direncini artırdığı, penetrasyon değerini düşürdüğü belirlenmiştir. GNP modifiyeli bitüm saf bitüme göre düşük sıcaklık özellikleri benzer olmasına rağmen bitümün sertleşmesinden dolayı düşük sıcaklık çatlamlarına daha yatkın olabileceği ifade edilmiştir. Ayrıca elastik geri dönme miktarının arttığı belirtilmiştir.

Han *et al.* (2018), çalışmalarında %0,01 artışla %0,03 - %0,07 aralığındaki oranlarda GNP ve %5 oranında SBS ile GNP/SBS modifiyeli bitüm elde etmişlerdir. Çalışmada GNP ve SBS bitümle ilk başta 5000 devir/dakika karıştırma hızında 40 dakika süre boyunca 170°C sıcaklıkta karıştırılmış ardından stabilizer eklenerek 500 devir/dakika hızında 60 dakika süre boyunca karıştırılmıştır. GNP içeriğinin artması %0,06'ya kadar sünekliliği ve yumuşama noktasını artırmıştır. Saf bitüme kıyasla ise katkı kullanımı süneklilik ve yumuşama noktasını artırmış, penetrasyon değerini ise düşürmüştür. Optimum GNP oranı %0,05 olarak belirlenmiştir. Çalışmada GNP katkısının yüksek ve düşük sıcaklık performansını artırdığı belirtilmiştir.

Hafeez *et al.* (2019), çalışmalarında bitüme ağırlıkça %2 ve %4 oranlarında GNP ekleyerek modifiye bitüm elde ederek kaplamanın performansını artırmayı hedeflemişlerdir. Çalışmada bitüm 60/70 penetrasyonlu, karıştırma sıcaklığı 158°C, karıştırma süresi 10 dakika olarak alınmış ve cam çubukla karıştırma işlemi yapılmıştır. Çalışmada yüksek hızlı mikser kullanımı olmadan GNP'lerin bitüm ile karıştırılabileceği ve bunun da karıştırma maliyetini önemli ölçüde azaltacağı ifade edilmiştir. Çalışma sonuçlarına göre GNP katkısının kullanılması penetrasyon değerini saf bitüme kıyasla %48'e kadar azalttığı, yumuşama noktası değerini %19'a kadar artırdığı belirlenmiştir. Depolama kararlılığı testine göre GNP'lerin bitüm

içerisinde çökmeden uzun süre depolanabileceği belirlenmiştir. Karmaşık kayma modülünde en büyük artış GNP katkısının %4 oranında kullanımında gerçekleşmiştir ve faz açısında da azalış meydana gelmiştir. GNP katkısının eklenmesi saf bitüme kıyasla; ısıya duyarlılığı, nem duyarlılığını azalttığı, kalıcı deformasyon direncini, dinamik modülünü, çekme mukavemetini, cilalanmaya karşı direncini artırdığı belirlenmiştir. Ayrıca modifiye bitümlü kaplamaların ilk yapım maliyetinin fazla olmasına rağmen bakım ve onarım masraflarının az olmasından dolayı daha ekonomik olacağı ifade edilmiştir.

Chen *et al.* (2020), çalışmalarında bitüme GNP ve kauçuk tozu ekleyerek bitümlü kaplamaların hizmet ömrünü artırmak ve kaplamanın performansını iyileştirmeyi amaçlamışlardır. Modifiye bitüm elde etmek için bitüm sınıfı 60/80 penetrasyonlu, GNP %0,05 katkı oranı, kauçuk %18 katkı oranı, karıştırma sıcaklığı 185°C, karıştırma süresi 45 dakika, karıştırma hızı ise yüksek olacak şekilde alınmıştır. Çalışma sonuçlarına göre GNP/kauçuk tozu, modifiye bitümlü sıcak karışımların yüksek sıcaklık performansını, ağır trafik yükleri altında kaplamanın performansını, düşük sıcaklıktaki çatlama direncini, tekerlek izi direncini, kohezyonu artırdığı belirlenmiştir. Ayrıca FTIR sonuçlarına göre GNP/kauçuk tozu bitüm ile daha çok fiziksel olarak karıştığı ifade edilmiştir.

Jiménez-Suárez and Prolongo (2020), çalışmalarında GNP katkısının mekanik davranışları iyileştirdiğini, termal iletkenliği artırdığını, alev geciktirici özelliklere sahip olduğunu, nem direncini artırdığını, donma-çözülme direncini artırdığını ifade etmişlerdir. Ayrıca yağlara eklendiğinde yağ yapılarını güçlendirdiği belirtilmiştir.

Zhou *et al.* (2021), çalışmalarında GNP ve polietilen (PE) katkıları ile modifiye edilmiş bitüm kullanarak kaplama performansını ve yüksek sıcaklık performansını iyileştirmeyi hedeflemişlerdir. Karışım hızı 5000 devir/dakika, karıştırma sıcaklığı 170°C ve karıştırma süresi 30 dakika olarak belirlenmiştir. Çalışma sonuçlarına göre GNP/PE modifiye bitümün saf bitüme kıyasla, yumuşama noktasını, sünekliği, esnekliği, artırdığı, penetrasyon değerini azalttığı belirlenmiştir. Yüksek sıcaklık performansını ve düşük sıcaklık çatlama direncini iyileştirdiği belirlenmiştir. GNP/PE katkı maddesi bitümün reolojik özelliklerini etkili bir şekilde geliştirdiği ifade edilmiştir. Ayrıca yüksek sıcaklıkta tekerlek izi direncinin arttığı, yorulma çatlaklarının oluşumunu ve yayılımını azalttığı belirtilmiştir.

Wu *et al.* (2022), çalışmalarında SBS modifiyeli bitüme ağırlıkça %0,5 artışla %0,5 - %2 aralığında GNP katkısı eklemişlerdir. Çalışmada reolojik ve termal özellikler araştırılmıştır. Çalışma sonuçlarına göre GNP katkısı viskoziteyi, sülfoksit gruplarını, elastik geri dönmeyi, aktivasyon enerjisini, ısı kapasitesini artırmıştır. Yüksek oranlarda GNP kullanımının bitüm içerisinde topaklanma meydana getireceğini ve homojen karışım elde edilemeyeceği ifade

edilmiştir. Optimum GNP katkı oranı çalışmada %1,5 olarak belirlenmiştir. Ayrıca bitümün sıcaklık hassasiyetini ve tekerlek izi direncini artırdığı, reolojik özelliklerini geliştirdiği, termal stabilitesini ise artırdığı ifade edilmiştir.

Ghalandari Shamami *et al.* (2023), çalışmalarında GNP kullanarak modifiye ettikleri bitümün ve bitümlü sıcak karışımın performans özelliklerini incelemişlerdir. Çalışmada GNP katkı oranları %0,1, %0,3 ve %0,5 olarak, karıştırma sıcaklığı 150°C, karıştırma hızı 4500 devir/dakika, karıştırma süresi 45 dakika olarak alınmıştır. Çalışma sonuçlarına göre optimum katkı oranı %0,5 olarak belirlenmiştir. GNP katkısının bitümün penetrasyonunu azalttığı, yumuşama noktası değerini ve viskoziteyi artırdığı belirlenmiştir. Dolaylı çekme sertlik modülü deneyine göre deformasyon miktarında azalış ve sertlik modülünde artış meydana gelmiştir. Yorulma performansının ve çatlak yayılımına karşı direncin arttığı belirlenmiştir. Tekrarlanan eksenel yük deneyine göre GNP modifiyeli bitümün saf bitüme göre deformasyonu azaltmıştır. Ayrıca GNP modifiye bitümlü numunelerin saf bitümlü numunelere kıyasla yorulma ömrünün daha uzun olduğu, kalıcı deformasyon miktarının ve nem hassasiyetinin daha az olduğu vurgulanmıştır. GNP modifiye bitüm ile yapılacak kaplamaların ilk yapım maliyetlerinin yüksek olmasına karşın yüksek performanslarından dolayı kullanımlarının ekonomik olabileceği ifade edilmiştir.

Kenevir tohumu yağının kullanıldığı çalışmalar

Serin and Demirezer (2021) yaptıkları çalışmada bitümün fiziksel, mekanik ve hidrofobik özelliklerini iyileştirmek amacıyla; keten tohumu, kenevir tohumu, defne yaprağı, kantaron, hint ve çam terebentin yağlarını çeşitli oranlarda kullanarak bitümü modifiye etmişlerdir. Modifiye edilen bitümlere penetrasyon, yumuşama noktası ve özgül ağırlık deneyleri uygulanmıştır. Kenevir tohumu yağı %3, %5 ve %7 oranlarında kullanılmıştır. Kenevir tohumu yağı ilavesi penetrasyon değerini artırmış en yüksek artış %7 oranında gerçekleşmiştir. Saf bitümün penetrasyon değeri 62,80 iken %3 kenevir yağı eklenmesi ile penetrasyon değeri 63,7 olmuştur. Yumuşama noktası ise saf bitümde 47,70°C iken; %3 katkı oranında 51,10°C, %5 katkı oranında 50,50°C ve %7 katkı oranında 48,75°C olarak bulunmuştur. Kenevir yağı katkısı hem penetrasyon hem de yumuşama noktası değerlerini artırmıştır. Ayrıca modifiye bitümlerin su ile temas açıları ölçülerek suya karşı duyarlılıkları belirlenmiştir. Özellikle %3 ve %5 miktarlarında kenevir tohumu yağı kullanılması bitümün hidrofobik özelliklerini artırmıştır. Eletron dağılım spektroskopisi (EDX) analizlerine göre ise kenevir yağı katkılı bitümlerin kimyasal bileşenlerinde farklılıklar olduğu görülmektedir. Sonuç olarak kenevir tohumu yağının modifiye edici olarak etkili bir katkı malzemesi olabileceği ifade edilmiştir.

Li (2018), çalışmasında öncelikle kenevir yağı içerisinde bulunan yağ asitleri ile iki farklı vitrimer hazırlamıştır. İlk olarak kenevir tohumu yağ asitlerine dayalı poliepoksi (HO-EP) ile maleopimarik asit (MPA) kürlenerek oluşturulmuştur. İkincisi, kenevir tohumu yağ asitlerine dayalı poliasit (HO-polyacid) ile maleopimarik asitin epoksi türevi (MPA-EP) kürlenerek oluşturulmuştur. Her iki vitrimerde dinamik mekanik özellikler, termal kararlılık, şekil hafızası ve kendini onarabilme kabiliyetleri bakımından incelenmiştir. Maleopimarik asit ve epoksi türevi içeriği arttıkça mekanik özelliklerde performans artışı olmuştur. HO-EP/MPA için, 2/1 oranındaki vitrimler daha iyi gerilim-gevşeme ve kendini onarabilme kabiliyeti gösterirken, 1.5/1 oranındaki vitrimler daha iyi şekil hafızasına sahip olmuştur. MPA-EP/HO-polyacid için, 1/1 oranındaki vitrimerin gerilim gevşeme ve kendini onarabilme kabiliyeti 1.5/1 ve 2/1 oranlarındakilere göre daha iyi olduğu belirlenmiştir.

Çeşitli bitkisel yağların kullanıldığı çalışmalar

Sonibare *et al.* (2021), adlı çalışmada yol kaplamasındaki performansın iyileştirilmesi için bitkisel yağ modifiye edici olarak kullanılmıştır. Mekanizmayı moleküler ayrıntılarıyla incelemek için, atık bitkisel yağdaki (ABY) ana yağ asidi bileşenleri (linoleik asit, oleik asit, palmitik asit dahil) ve bunların farklı sıcaklıklarda model asfalt ile karışımları üzerinde moleküler dinamik (MD) simülasyonları yapılmıştır. Sonuç olarak, bitkisel yağın modifiye edici olarak kullanılması, model asfalt karışımındaki bileşenlerin daha homojen bir şekilde bulunmasını ve asfaltın düşük sıcaklıklarda performansını arttırdığı söylenmiştir. Ayrıca asfaltın viskozitesini yüksek sıcaklıkta önemli ölçüde değiştirmeyip, düşük sıcaklıkta viskoziteyi azalttığı ifade edilmiştir.

Al-Omari *et al.* (2018), yaptıkları çalışmada modifiye edici olarak hacimce %1, %2, %4, %6 ve %8 oranında atık bitkisel yağ kullanılmıştır. Kullanılan yağ oranı arttıkça modifiye edilmiş bitümün penetrasyonun arttığı, yumuşama noktasının düştüğü, parlama ve yanma noktalarının yükseldiği, viskozitenin azaldığı ortaya konulmuştur. Sonuç olarak; sünekliliğin iyileştirildiği, daha düşük sıcaklıklarda daha iyi işlenebilirlik elde edildiği ve %4 üzerindeki karışımlarda tekerlek izi direncinin azaldığı bulunmuştur.

Asli *et al.* (2012), çalışmalarında bitümlü bağlayıcıyı gençleştirmek için atık yemeklik yağın etkilerini incelemişlerdir. Saf bitüm, yaşlandırılmış bitüm ve yenilenmiş bitümün fiziksel özellikleri ölçülmüş ve karşılaştırmaları yapılmıştır. Bitümlü bağlayıcılara uygulanan deneylerden; Yumuşama noktası, penetrasyon ve Brookfield viskozitesi deneyleri yapılmıştır. Sonuçları değerlendirmek için istatistiksel analizlerden faydalanılmıştır. Sonuçlar genellikle, atık yağ eklenmesiyle eski bitümün, orijinal bitümün (80/100) fiziksel özelliklerine benzer özelliklerde olduğunu başka bir deyişle atık yağın eski bitümün gençleşmesini sağladığı

bulunmuştur. 50/60, 40/50 ve 30/40 olan yenilenmiş yaşlı bitüm grubu için optimum atık yemeklik yağ yüzdesi, sırasıyla %1, %3-4 ve %4-5 olduğu ortaya konmuştur. Ayrıca çalışmada yapılan istatistiksel analizler ile orijinal bitüm ve gençleştirilmiş bitüm arasında önemli bir fark olmadığını da doğrulamıştır.

Cooper III *et al.* (2013) yaptıkları çalışmada biyo-yağ (biyo-bağlayıcı) kullanılarak bitüm modifiye edilmiş ve çeşitli deneyler ile geleneksel bitüm ile karşılaştırılmıştır. Çalışmada tekerlek izi performansını belirlemek için Hamburg yüklü tekerlek test cihazı (Hamburg loaded-wheel tester), nem direncini belirlemek için Lottman testi, kırılma direnci belirlemek için de yarı dairesel eğilme (semi circular bending – SCB) deneyi yapılmıştır. Sonuç olarak tekerlek izi performansı geleneksel karışımlar ile karşılaştırıldığında benzer ya da daha iyi bir performans göstermiştir. Nem direnci bakımından; hazırlanan karışımlardan birçoğunun çekme mukavemeti oranı %80'i geçtiği ifade edilmiştir. Ayrıca biyo-bağlayıcı içeren karışımlar geleneksel karışımlara göre ora sıcaklıklarda daha düşük kırılma direnci sergilediği bununda biyo-bağlayıcının karışımı sertleştirdiği için olabileceği ifade edilmiştir.

Tarar *et al.* (2020), çalışmada Asfalt bağlayıcıların Ayçiçek yağı katılması ile oluşan kimyasal değişimleri, yaşlanma davranışı ve karıştırma homojenliği, depolama kararlılığı fourier dönüşümü kızılötesi (FTIR) analizi yoluyla incelenmiştir. Bağlayıcılarda ayçiçeği yağı modifikasyonu dönel viskozimetresi, dinamik kayma reometresi ve eğilme kırışi reometresi testleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Farklı test analizleri için Superpave kullanılmıştır. FTIR sonuçlarına göre, ayçiçek yağı ile karıştırılmış bağlayıcılarda 1163 cm(-1) ve 1745 cm(-1)'de yeni esterleşme zirvelerinin indüklendiğini ortaya çıkmıştır. Ayçiçek yağlı modifiye bağlayıcılar, alfa-tokoferolün varlığından kaynaklanabilecek yaşlanma karşıtı davranış gösterdiği ifade edilmiştir. Bağlayıcılarda ayçiçek yağının kullanılmasının yorulma parametresini %58'e kadar iyileştirdiği gözlenmiştir. Doğrusal genlik tarama testi sonuçları, yağ ilavesinin asfalt bağlayıcıların yorulma ömrünü arttırdığını göstermiştir.

Yalcin and Yilmaz (2022) çalışmada atık bitkisel yağ ve motor yağı kullanılarak modifiye edilen bitümün fiziksel, kimyasal ve reolojik özellikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Çalışmada atık bitkisel ve motor yağları 7 farklı oranda saf bitüme katılmıştır. Modifiye edilmiş bitümün fiziksel ve mekanik özelliklerini değerlendirilmesi amacıyla modifiye bitümlere penetrasyon, yumuşama noktası ve parlama noktası deneyleri yapılmıştır. Ayrıca modifiye bitümün reolojik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla dönel viskozimetre ve dinamik kayma reometresi deneyleri uygulanmıştır. Fourier dönüşümü kızılötesi spektroskopisi (FTIR) analizi ile bitümün ve modifiye bitümün fonksiyonel grupları ve kimyasal bağ yapıları incelenmiştir. Çalışma sonuçlarına göre; atık bitkisel yağ ve atık motor yağının saf bitüme

katılması viskozitede ve yumuşama noktasında düşüşe neden olurken, penetrasyon değerinde ise artışa neden olduğu belirlenmiştir.

Joni *et al.* (2020) çalışmada atık bitkisel yağ ve atık plastik (polivinil klorür-PVC) bitüm içerisine sırasıyla %1, %2, %3 ve %1, %3 ve %5 oranlarında ilave edilerek modifiye bitüm oluşturulmuştur. Saf bitüme ve modifiye edilmiş bitümlere penetrasyon, yumuşama noktası, düktilite, kinematik viskozimetre, parlama noktası, RTFOT kütle kaybı deneyi yapılmıştır. Çalışmada atık bitkisel yağ ile modifiye edilmiş bitümün atık lastik ile modifiye edilen bitüme göre daha iyi termal çatlama direncine sahip olduğu belirlenmiştir. Ayrıca bitkisel yağ ile modifiye edilen bitümün tekerlek izi direncinin yüksek olduğu ve orta/soğuk bölgelerde kullanılmaya daha uygun olduğu ifade edilmiştir.

Kırılma özelliklerinin incelendiği araştırmalar

Falchetto *et al.* (2018), çalışmada bitümlü karışımların düşük sıcaklık özellikleri için dolaylı çekme (IDT) ve yarı dairesel eğilme (SCB) deneysel yöntemleri değerlendirilmiştir. 10 farklı bitümlü karışım numunelerine dolaylı çekme, yarı dairesel eğilme ve çentikli yarı dairesel eğilme deneyleri yapılmıştır. Yarı dairesel eğilme numunelerinin çatlak yüzeyindeki maksimum gerilme sonlu eleman yazılımı kullanılarak tahmin edilmiştir. Çentikli yarı daire eğilme ve dolaylı çekme deney sonuçlarına göre numunelerin mukavemet değerleri arasında bir dizi basit doğrusal ilişki elde edilmiştir. Yeni önerilen ilişkinin, çentikli yarı daire eğilme testlerine dayanan dolaylı çekme numunelerinin bitümlü karışımların mukavemetini tahmin etmek için potansiyel olarak kullanılabilmesi bulunmuştur. Çentiksiz numunelerdeki yarı daire eğilme (SCB) kuvveti ile bu aşamada karşılık gelen dolaylı çekme (IDT) ölçümleri arasında tutarlı bir korelasyon bulunamadığı ifade edilmiştir.

Shu *et al.* (2010), çalışmada geri dönüştürülmüş asfalt kaplamanın, bitümlü karışımların çatlama direnci üzerindeki etkisinin değerlendirilmesi için yarı daire eğilme (SCB) testi kullanılmıştır. Çalışma sonuçlarına göre geri dönüştürülmüş asfalt kaplamanın bitümlü karışımlara katılması ile genel olarak gerilme mukavemetinin artış gösterdiği ve SCB testinde kırılma tokluğunu azalttığı görülmüştür. Çekme mukavemeti ve kırılma testlerini içeren SCB testinin, bitümlü karışımlarının çatlama direncini değerlendirmede potansiyel olarak etkili bir test olduğu ifade edilmiştir.

Huang *et al.* (2011), çalışmada geri dönüştürülmüş asfalt kaplama No. 4 elekten geçirilip bitümlü sıcak karışıma katılarak, laboratuvar performans testleri yardımıyla çatlama dirençleri karakterize edilmiştir. Karışımın çatlama direnci, Superpave dolaylı çekme (IDT), ve yarı daire eğilme (SCB) testleri ile değerlendirildi. Çalışma sonuçlarına göre geri dönüştürülmüş

asfalt kaplama eklenmesi ile bitümlü sıcak karışımların sertliği ve dolaylı çekme mukavemetinin arttığı çatlama direncinin ise azaldığı ifade edilmiştir.

Li and Marasteanu (2010a) çalışmada düşük sıcaklıkta asfalt karışımının kırılma süreci bölgesinin (the fracture process zone – FPZ) araştırılması için yarım daire eğilme (SCB) ile düşük sıcaklıkta kırılma testi gerçekleştirdi. SCB testi; yükleme hızı ve çentik uzunluğunun etkisini değerlendirmek için üç farklı yükleme hızı ve üç farklı çentik uzunluğu (5, 15, 30 mm) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. SCB numunesinin kırılma süreci, sekiz kanallı bir akustik (acoustic system AE) sistemi kullanılarak izlenmiştir. SCB deneyi -30°C, -18°C, -6°C olmak üzere 3 düşük sıcaklıkta yapılmıştır. Yükleme hızının etkisini belirlemek için 0,00015 mm/s ve 0,005 mm/s hızlarında da yükleme yapılmıştır. Yarım daire eğilme sonuçları incelendiğinde karışımların tamamı, sıcaklık ve yükleme ile benzer davranışta göstermiştir. Kırılma süreci bölgesi için çentik uzunluğunun belirgin bir fark yaratmadığı ifade edilmiştir.

Li and Marasteanu (2010b) çalışmada bağlayıcı tipi, modifiye edici, agrega tipi ile hava boşlukları gibi faktörlerin bir kombinasyonunu ve yükleme hızı ile ilk çentik uzunluğuna ilişkin iki test koşulunun bir kombinasyonunu temsil eden altı asfalt karışımının kırılma direnci, üç farklı sıcaklıkta yarım daire eğilme (SCB) testi yapılarak değerlendirilmiştir. Çalışmada agrega türü ve hava boşluğu içeriğinin bitümlü sıcak karışımlarının kırılma direncinin üzerindeki etkisi gösterilmiştir. Yüksek deney sıcaklıklarında ise yükleme hızı ve çentik derinliği kırılma enerjisi üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. Çalışma sonucunda yükleme hızının kırılma enerjisi üzerinde etkili olduğu ve kırılma enerjisi, her üç sıcaklıkta da yükleme hızındaki artışla azaldığı ifade edilmiştir.

Artamendi and Khalid (2006), çalışmada iki tür bitümlü karışımda (taş mastik asfalt ve bitüm makadam) kırılma özelliklerinin belirlenmesi için üç noktalı eğilme deneyi (SENB) ve yarım daire eğilme deneyi (SCB) yapılmıştır. Deneysel sonuçlar, Mod I kırığı için her iki numune geometrisi arasındaki gerilme yoğunluğu faktöründe iyi bir uyum göstermiştir. Ayrıca her iki numune geometrisinin bitümlü karışımlar için karışık Mod kırığı için uygun olduğunu da göstermiştir.

Behbahani *et al.* (2013) yaptığı çalışmada Polifosforik asit (PPA), Stiren bütadien stiren (SBS), çizgi önleyici madde (ANTI), kauçuk parçaları (CR) ve FT-parafin mumu (Sasobit) kullanılarak modifiye bitüm elde edilmiştir. Modifiye edilen bitümün çatlama davranışını incelemek için bir kırılma tokluğu deneyi olan yarım daire eğilme deneyi (SCB) yapılmıştır. -15°C sıcaklıkta testler yapılmıştır. Çalışma sonucuna göre tüm katkı maddelerinin bitümlü karışımın düşük sıcaklıkta kırılma tokluğunu arttırdığı ifade edilmiştir. Kırılma tokluğu ve K_{Ic}

değerindeki en büyük artışların sasobit ve kauçuk parçaları eklenmesi ile elde edildiği bulunmuştur.



MATERYAL ve YÖNTEM

Materyal

Çalışmada kullanılan materyaller, bu materyallerin özellikleri bu bölümde detaylı bir şekilde açıklanmıştır.

Bitüm

KGM bitümler için geleneksel ve superpave (üstün performanslı asfalt kaplama) olmak üzere iki farklı sınıflama sistemi kullanılmaktadır. Geleneksel sınıflandırma bitümün penetrasyon değerine göre yapılmaktadır. Superpave sınıflandırma ise düşük, orta ve yüksek sıcaklık şartlarında bitümün mekanik ve reolojik özelliklerine bağlı olarak yapılmaktadır (Anonymous, 2013). Çalışmada 70/100 bitüm sınıfı kullanılmıştır. Saf bitüme penetrasyon, yumuşama noktası, parlama noktası ve özgül ağırlık deneyleri yapılmıştır. Saf bitümün özellikleri Tablo 1.'de verilmiştir.

Tablo 1. B 70/100 Penetrasyonlu Saf Bitümün Özellikleri

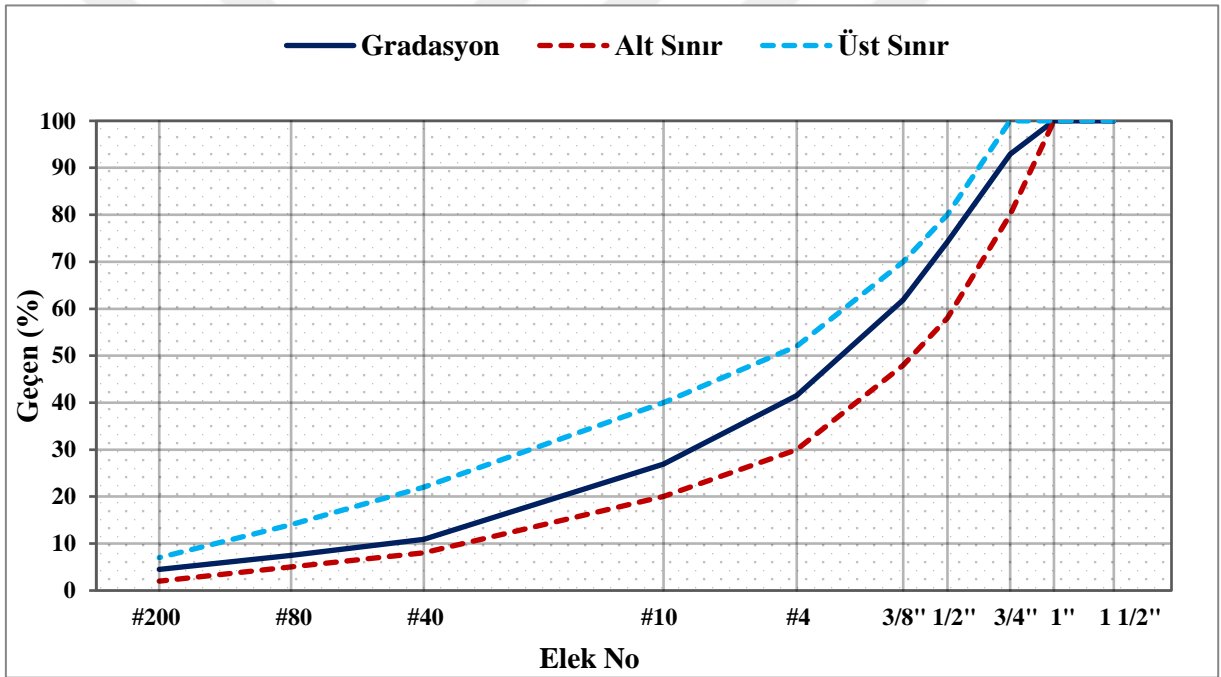
Yapılan Testler	B 70/100		
	Test Standardı	Limit Değerleri	Ölçülen Değerler
Penetrasyon (0,1 mm)	TS EN 1426	70-100	90,80
RTFOT Sonrası Penetrasyon (0,1 mm)			50,50
Yumuşama Noktası (°C)	TS EN 1427	43-51	45,50
RTFOT Sonrası Yumuşama Noktası (°C)			53
Parlama Noktası (°C)	TS EN 22719	min 230	290
Özgül Ağırlık (gr/cm ³)	TS 1087	1,0-1,1	1,02
Elastik Geri Dönme %	TS EN 13398		9 (%)

Agrega ve Filler

Karayolları teknik şartnamesinde binder ve aşınma tabakaları için ayrı ayrı gradasyon alt ve üst limitleri belirtilmiştir. Çalışmada binder tabakasına uygun bir gradasyon oluşturmak için agregaların elek analizi yapılmış ve şartname limitleri içerisinde bir gradasyon belirlenmiştir. Belirlenen gradasyon ve karayolları teknik şartname limitleri Tablo 2'de, gradasyon eğrisi ise Şekil 10'da verilmiştir.

Tablo 2. Agrega Elek Analizi

Elek Açıklığı		Geçen %	Binder Tabakası Şartname Limitleri	
mm	inch			
37.50	1 1/2"	100	100	100
25.40	1"	100	100	100
19.10	3/4"	92,9	80	100
12.70	1/2"	74,2	58	80
9.52	3/8"	61,9	48	70
4.76	No.4	41,5	30	52
2.00	No.10	26,9	20	40
0.42	No.40	10,9	8	22
0.177	No.80	7,5	5	14
0.075	No.200	4,5	2	7

**Şekil 10.** Gradasyon eğrisi

Kaba agreganın özgül ağırlık deneyi

Kaba agreganın özgül ağırlığının belirlenmesi için TS EN 1097 standartlarına uygun olarak numuneler hazırlanmış ve deneyleri yapılmıştır. Kaba agreganın özgül ağırlığını belirlemek için iki numune kullanılmaktadır. Yapılan elek analizi ve belirlenen gradasyona uygun olarak 25mm-4,76mm aralığında bulunan kaba agregalar toplamları 2kg olacak şekilde ayarlanarak tartılır. Tartılan agregalar 2kg'lık numuneler ayrı ayrı tepsilere koyularak yıkanır ardından tepsilere agregaların üzerini geçecek şekilde su ile doldurulur. 24 saat boyunca numuneler bu şekilde bekletilir. Bu süre sonunda agregalar elek yardımıyla dikkatlice süzülerek yüzeyleri havlu yardımıyla kurulanır. Suyu doymuş kuru yüzey haline gelen agregalar tartılır bu değer

W_{doygun} olarak ifade edilir. Ardından agregaların suda tartımları yapılır. Suda tartım sırasında agregalar arasında boşluk kalmaması için tel sepet birkaç defa sarsılarak tartım yapılır bu değer W_{suda} olarak ifade edilir. Tartımdan sonra agregaların tamamen kuruması için 24 saat boyunca 110°C sıcaklıktaki etüvde bekletilir.



Şekil 11. Kaba agrega özgül ağırlık deney numuneleri

24 saat boyunca etüvde kurutulan numuneler çıkarılarak tartılır bu değer W_{hava} olarak ifade edilir. Tartımlar bittikten sonra hacim özgül ağırlık, zahiri özgül ağırlık, efektif özgül ağırlık ve su emme yüzdeleri hesaplanmaktadır. Şekil 11’de numunelerin suda bekletilmesi, suya doygun kuru yüzey hali ve etüvde kurutulması verilmiştir.

$$G_{sa} = \frac{W_{hava}}{(W_{hava} - W_{suda})}$$

$$G_{sb} = \frac{W_{hava}}{(W_{doygun} - W_{suda})}$$

$$G_{se} = \frac{G_{sa} + G_{sb}}{2}$$

$$S_{\%} = \frac{W_{doygun} - W_{hava}}{W_{hava}} * 100$$

Verilen denklemler ile kaba agreganın zahiri özgül ağırlığı G_{sa} , hacim özgül ağırlığı G_{sb} , efektif özgül ağırlığı G_{se} ve su emme kapasitesi $S_{\%}$ hesaplanmaktadır.

İnce agrega özgül ağırlık deneyi

İnce agreganın özgül ağırlık deneyi için 2mm-0,075mm aralığında bulunan (4,76mm çaplı elekten geçen, 0,075mm elek üzerinde kalan) elenmiş agregalar gradasyona uygun olarak birer kg olacak şekilde iki numune hazırlanarak tartılır. Ardından agregaların üzerini geçecek kadar su ilave edilerek 24 saat boyunca bekletilir. Sürenin sonunda numuneler sıcak hava tabancası ile suya doygun kuru yüzey hale gelene kadar sıcak hava tutularak karıştırılır. Suya doygun kuru hale gelmesi abraham hunisi olarak bilinen metal bir huni ve huninin tokmağı ile belirlenmektedir. Huni içerisine 3 aşamada ve her aşama da 25 kere tokmak bırakılarak

doldurulur. Sonra huni kaldırılır, huninin şeklini alan numune ince bir mala ile ikiye ayrılır. Eğer numune ikiye ayrıldıktan sonra dokununca kendini bırakıyorsa suya doymun kuru yüzey haldedir. Eğer numune dokunmadan kendini bırakıyorsa fazla kurumuştur ve ilk aşama tekrar yapılmalıdır. Kendini bırakmıyorsa kurutma işlemine devam edilmelidir. Şekil 12’de ince agrega deneyinden görseller verilmiştir.



Şekil 12. İnce agrega deneyi görselleri

Suya doymun kuru yüzey hale gelince numune tartılır ve bu değer W_{doymun} olarak ifade edilir. Sonrasında iki adet temiz ve kuru piknometre alınır ve boş olarak tartılır bu değer W_p olarak gösterilir. Ardından piknometrenin çizgisine kadar su doldurularak tartılır bu değer W_{p+s} olarak gösterilir. Sonrasında piknometreler boşaltılıp etüvde kurutulur. Kuruyan temiz piknometrelere huni yardımıyla numuneler dikkatli bir şekilde doldurularak tartılır bu değer W_{p+a} olarak gösterilir. Ardından numunenin üzerine su eklenir. Hava kabarcığı kalmaması için piknometreler döndürülerek sarsılır. Piknometre çizgisini geçen su miktarı ve köpük peçete yardımıyla alınarak su ve agrega ile dolu piknometreler tartılır bu değer W_{p+a+s} olarak gösterilir. Tartımlar bittikten sonra piknometreler tepsilere çalkalanarak tamamen boşaltılır. Tepsiler etüvde 110°C sıcaklıkta bekletilerek suyun tamamen buharlaşması sağlanır ve kuru agreganın tartımı yapılır bu değer W_{hava} olarak gösterilir.

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

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

$$G_{se} = \frac{G_{sa} + G_{sb}}{2}$$

$$S_{\%} = \frac{W_{doymun} - W_{hava}}{W_{hava}} * 100$$

Yukarıda verilen denklemler ile ince agreganın zahiri özgül ağırlığı G_{sa} , hacim özgül ağırlığı G_{sb} , efektif özgül ağırlığı G_{se} ve su emme kapasitesi $S\%$ hesaplanmaktadır.

Filler özgül ağırlık deneyi

Filler özgül ağırlık deneyi için 0,075mm çapında elekten geçen filler agregalar iki ayrı kaba alınarak 100'er gram olacak şekilde hazırlanır. İki adet temiz ve kuru piknometre alınır ve boş olarak tartılır bu değer W_p olarak gösterilir. Ardından piknometrenin çizgisine kadar su doldurularak tartılır bu değer W_{p+s} olarak gösterilir. Sonrasında piknometreler boşaltılıp etüvde kurutulur. Kuruyan temiz piknometrelere huni yardımıyla numuneler dikkatli bir şekilde doldurularak tartılır bu değer W_{p+a} olarak gösterilir. Ardından numunenin üzerine su eklenir. Hava kabarcığı kalmaması için piknometreler döndürülerek sarsılır. Piknometre çizgisini geçen su miktarı ve köpük peçete yardımıyla alınarak su ve agrega ile dolu piknometreler tartılır bu değer W_{p+a+s} olarak gösterilir. Tartımlar bittikten sonra piknometreler tepsilere çalkalanarak tamamen boşaltılır. Tepsiler etüvde 110°C sıcaklıkta bekletilerek suyun tamamen buharlaşması sağlanır ve kuru filler agreganın tartımı yapılır bu değer W_{hava} olarak gösterilir.

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

Yukarıda verilen denklem ile filler agreganın zahiri özgül ağırlığı G_{sa} hesaplanmaktadır. Şekil 13'te filler özgül ağırlık deneyine ait görseller verilmiştir.



Şekil 13. Filler özgül ağırlık deneyi görselleri

Agregaların fiziksel özelliklerinin belirlemek amacıyla hacim özgül ağırlık, zahiri özgül ağırlık ve su emme deneyleri yapılmıştır. Deney sonuçlarına göre kullanılan agregaların fiziksel özellikleri Tablo 3.'te verilmiştir.

Tablo 3. Agregaların Fiziksel Özellikleri

Deneyler	Kaba Agregası	İnce Agregası	Filler
Hacim Özgül Ağırlık (g / cm ³)	2.695	2.692	-
Zahiri Özgül Ağırlık (g / cm ³)	2.710	2.713	2.721
Su Emme (%)	0.281	1.202	-

Grafen Nanoplatelet (GNP)

Grafen son yıllarda bulunan en önemli malzemelerden biri olarak kabul edilmektedir. Grafitin tek katmanlı hali olarak kalınlığı bir atom boyutunda yani yaklaşık olarak 0,34 nm'dir. Üretimi zor olmakla birlikte kitlesel olarak üretimi çok kısıtlıdır. Bu nedenle grafen nanoplateletler (GNP'ler) hem düşük maliyetleri sayesinde hem de üretiminin daha kolay olması ile grafene alternatif olarak sıklıkla kullanılmaya başlanmıştır. Grafen nanoplateletler kalınlıkları 0,7 ve 100 nm arasında değişen boyutlarda olabilmektedirler (Choi *et al.* 2010). Grafen gibi mekanik özellikleri ve termal iletkenlikleri yüksektir (Potts *et al.* 2011). GNP'ler katkı malzemesi olarak kullanılması genellikle malzemelerin mekanik davranışlarının iyileştirmesine katkı sunar. Ayrıca malzemelerin elektrik iletkenliklerini artırmak ve alev geciktirici işlev kazandırmak gibi farklı etkilerde sunmaktadır (Jiménez-Suárez and Prolongo, 2020). Literatür araştırmasında detaylıca yer verildiği gibi bitümlü sıcak karışımlarda katkı malzemesi olarak kullanımı genellikle stabilite üzerinde olumlu etkiler oluşturmaktadır. Çalışmada kullanılan grafen nanoplatelet ile ilgili özellikler ise aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Tablo 4. Grafen Nanoplateletlerin Özellikleri

Grafen Nanoplatelet	
Safılık	%99.9
Boyut	3 nm
Spesifik Alan	530 m ² /g
Çap	1.5µ

Kenevir tohumu yağı

Günümüzde ayçiçeği ve soya yağı gibi bitkisel yağlar yapılan çalışmalarda kapsamlı olarak incelenmiştir. Bu bitkisel yağlar gıda sektöründe de kullanılan yağlar olmasından dolayı başka sektörlerde kullanımlarının artması gıda güvenliğinde risk teşkil edecektir. Araştırmacılar yeni endüstriyel uygulamalar için gıda sektöründe kullanılmayan tohum yağları aramaya teşvik edilmektedir. Kenevir tohumu yağı gıda sektöründe nadiren kullanılmasının yanı sıra endüstriyel kullanımı üzerine yapılan çalışmaların sayısı da oldukça azdır. Kenevir tohumu yağı yaklaşık olarak %80 oranında doymamış yağ asitleri içermektedir. Bunlar %55-60 oranında linoleik asit (C18:2), %17-35 oranında linolenik asit (C18:3) ve %0-2 oranında

stearidonik (C18:4) asittir. Kenevir tohumu yağında yüksek oranda bulunan linoleik ve linolenik asitler kimyasal modifikasyon yoluyla fonksiyonel grupların kolayca eklenmesini sağlamaktadır. Kenevir tohumu yağı elde edilen bitkilerde tetrahidrokannabinol (THC, zihinsel uyarıcı madde) içeriği %0,3'ten azdır. Bu sebeple yetiştirilmesinde satılmasında tüketilmesinde herhangi bir yasal kısıtlama bulunmamaktadır (Li, 2018). Çalışmada kullanılan kenevir yağı soğuk sıkım tekniği ile elde edilmiştir ve saflık derecesi 1'dir.

Method

Taguchi yöntemi

Deney tasarımlarında bir parametre farklı seviyelerde kullanılırken diğer parametrelerin sabit tutulması tam faktöriyel deney tasarımı ya da geleneksel deney tasarımı olarak adlandırılır. Bu deney tasarımlarında her adımda sadece bir parametrenin seviyesi değiştirilebildiği için toplam deney sayısı, parametre ve seviye arttıkça daha da artmaktadır. Birden fazla seviyeye sahip çeşitli parametrelerin bir arada kullanılması ve optimum seviyelerini belirlemek amacıyla çok sayıda deney yapılması hem zaman hem de ekonomi açısından olumsuz etkilere neden olmaktadır. Taguchi Deneysel Tasarım Yöntemi, zaman ve ekonominin verimli bir şekilde kullanılmasına, deneysel süreçlerin optimize edilmesine ve ürün kalitesinin artırılmasına önemli katkılarda bulunmaktadır (Aman *et al.* 2023). Taguchi metodu deney sayısının azaltılmak, deney planı oluşturmak ve optimizasyon yapmak için mühendislik problemlerinde sıkça kullanılmaktadır (Mola *et al.* 2021; Baş *et al.* 2022; Çolak *et al.* 2023).

Taguchi yönteminde genellikle optimizasyon kriteri olarak performans istatistikleri (S/N) seçilmektedir. Performans istatistiklerinde; en büyüğün, nominalin (hedef değer) ve en küçüğün en iyi olması şeklinde 3 durum vardır. Optimum deney sonucunun maksimum olması istenilen durumda en büyük-en iyi; minimum olması istenilen durumda en küçük-en iyi, ortalamada kalması istenilen durumda nominal-en iyi performans istatistiği kullanılmaktadır. Uygun performans istatistiği seçilerek S/N değerleri aşağıda verilen denklemler kullanılarak hesap edilmektedir.

$$\text{En büyük – en iyi} \quad S/N_L = -10\text{Log} \left[\frac{1}{n} \sum_1^n \frac{1}{Y_i^2} \right]$$

$$\text{En küçük – en iyi} \quad S/N_L = -10\text{Log} \left[\frac{1}{n} \sum_1^n Y_i^2 \right]$$

Burada;

S/N_L :performans istatistiğini,

n :deney kombinasyonundaki tekrar sayısını,

Y_i :değeri ise i. deneyin performans istatistiğini göstermektedir.

Çalışmada Taguchi yöntemi kullanılarak deney planı hazırlanmıştır. En büyük-en iyi, en küçük-en iyi performans istatistikleri kullanılarak optimum seviye tahminleri %95 güven aralığı içerisinde yapılmıştır. Taguchi optimizasyon yönteminde kullanılan parametreler ve bu parametrelere ait seviyeler Tablo 5.'te verilmiştir. 4 seviye ve 4 parametre için deney planını oluşturan L16 ortogonal dizisi ise Tablo 6'da verilmektedir.

Tablo 5. Deney Karışımlarının Parametreleri ve Seviyeleri

Parametre	Seviye			
	1	2	3	4
(A) Grafen (%)	0.00 (A1)	0.25 (A2)	0.50 (A3)	1.00 (A4)
(B) Yağ (%)	0.00 (B1)	0.50 (B2)	1.00 (B3)	2.00 (B4)
(C) Sıcaklık (°C)	120 (C1)	140 (C2)	160 (C3)	180 (C4)
(D) Süre (dakika)	10 (D1)	20 (D2)	30 (D3)	40 (D4)

Tablo 6. Deney Planı

Deney No	Grafen (%)	Yağ (%)	Sıcaklık (°C)	Süre (dak.)
1	A1 (0.00)	B1 (0.00)	C1 (120)	D1 (10)
2	A1 (0.00)	B2 (0.50)	C2 (140)	D2 (20)
3	A1 (0.00)	B3 (1.00)	C3 (160)	D3 (30)
4	A1 (0.00)	B4 (2.00)	C4 (180)	D4 (40)
5	A2 (0.25)	B1 (0.00)	C2 (140)	D3 (30)
6	A2 (0.25)	B2 (0.50)	C1 (120)	D4 (40)
7	A2 (0.25)	B3 (1.00)	C4 (180)	D1 (10)
8	A2 (0.25)	B4 (2.00)	C3 (160)	D2 (20)
9	A3 (0.50)	B1 (0.00)	C3 (160)	D4 (40)
10	A3 (0.50)	B2 (0.50)	C4 (180)	D3 (30)
11	A3 (0.50)	B3 (1.00)	C1 (120)	D2 (20)
12	A3 (0.50)	B4 (2.00)	C2 (140)	D1 (10)
13	A4 (1.00)	B1 (0.00)	C4 (180)	D2 (20)
14	A4 (1.00)	B2 (0.50)	C3 (160)	D1 (10)
15	A4 (1.00)	B3 (1.00)	C2 (140)	D4 (40)
16	A4 (1.00)	B4 (2.00)	C1 (120)	D3 (30)

Modifiye bitümün hazırlanması

Deney planında verilen modifiye bitüm karışımlarının hazırlanması için sıcaklık kontrollü ısıtıcı kap ve yüksek hızlı karıştırıcı (high shear mixer) kullanılmıştır. Öncelikle deney

planında bulunan her bir karışım için yeterli miktarda saf bitüm ısıtılmadan varillerden çıkarılıp tartılmıştır. Bitüm ağırlığına göre her bir karışım için deney planında belirtilen katkı maddelerinin ağırlığı belirlenmiştir. Karıştırma işlemi 3000 sabit devirde yapılmıştır. Her bir karışım deney planında belirtilen sıcaklıkta ve süre ile karıştırılmıştır. Şekil 14'te ısıtıcı kap ve yüksek hızlı karıştırıcı gösterilmiştir. Hazırlanan modifiye bitümlere penetrasyon, yumuşama noktası, RTFOT kütle kaybı, RTFOT sonrası yumuşama noktası, RTFOT sonrası penetrasyon, Elastik geri dönme, parlama noktası deneyleri yapılmıştır. Ayrıca taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri alınarak karışım numunesinin yüzey topografyası, Geçirimli elektron mikroskobu (TEM) görüntüleri alınarak ise numunenin iç yapısı incelenmiştir. Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FTIR) ile karışımların saf bitüme kıyasla kimyasal bağ yapılarında olan değişimler incelenmiştir.



Şekil 14. Yüksek hızlı mikser ve ısıtıcı kap

Modifiye bitüme uygulanan deneyler

Çalışmada geleneksel bağlayıcı deneyleri saf bitüme ve modifiye edilmiş bitümlere uygulanmıştır. Penetrasyon, yumuşama noktası, parlama noktası ve elastik geri dönme, dönele ince film halinde ısıtma deneyi (RTFOT), RTFOT sonrası penetrasyon ve yumuşama noktası deneyleri uygulanmıştır.

Bitüm özgül ağırlık tayini deneyi

Saf bitümün özgül ağırlığının belirlenmesi amacıyla TS EN 15326+A1 standardına göre piknometre yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemde kullanılacak piknometrenin hacmi 25 cm³ ve ağırlığı yaklaşık 40 gram olmalıdır. Deneyin yapılışında ilk olarak piknometrenin boş ağırlığı tartılır. Sonra 25°C sıcaklığa sahip damıtılmış su doldurularak tekrar kapağı kapatılır. Piknometrenin dış yüzeyi kurularak tartılır. Sonra piknometre boşaltılıp kurutularak çentik çizgisine kadar içerisi bitüm ile doldurulur. Piknometrenin herhangi bir kısmına bitüm bulaşmaması için huni kullanılabilir. Bitüm koyulduktan sonra yine 25°C sıcaklıkta tartılır. Son olarak bitüm üzerine piknometreyi tamamen dolduracak kadar su eklenir kapağı kapatılır ve taşan su silinerek tekrar tartılır. Şekil 15’te piknometrenin görseli verilmiştir.



Şekil 15. Piknometre ve tartım işlemi

Tartım işlemleri bittikten sonra aşağıda verilen formül yardımı ile bitümün özgül ağırlığı belirlenir.

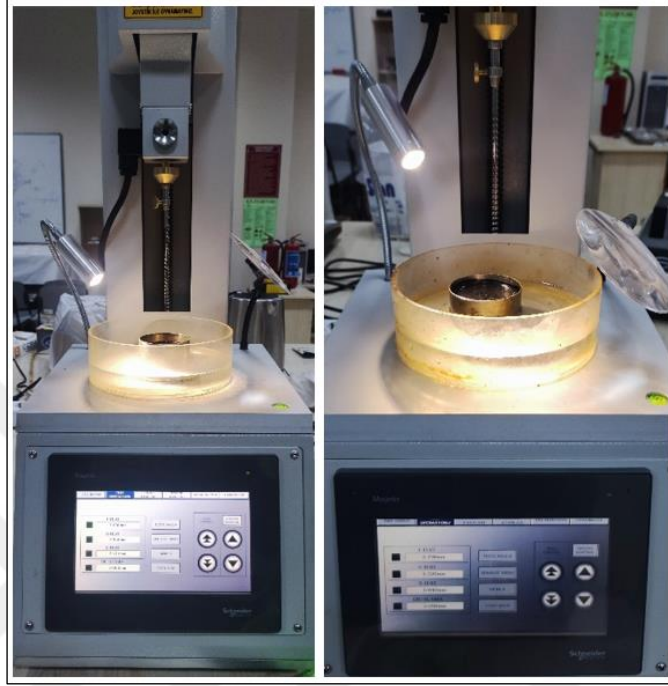
$$d_{bitüm} = \frac{c - a}{(b - a) - (d - c)}$$

Burada; $d_{bitüm}$ Bitümün özgül ağırlığını, a piknometrenin ağırlığı (kapak dahil), b su dolu piknometrenin ağırlığı, c çentiğe kadar doldurulmuş bitüm ve piknometrenin ağırlığı, d ise üzeri su ile tamamen doldurulmuş bitüm ve piknometrenin ağırlığıdır.

Penetrasyon deneyi

Bitümün sertliğini ve kıvamını belirlemek için penetrasyon deneyi TS EN 1427 standardına göre uygulanmaktadır. Penetrasyon değeri standart bir iğnenin 5 saniye süresince 100 gram yük altında numuneye batma miktarını ifade etmektedir. Deney numunesi hazırlanırken bitüm yumuşama noktası sıcaklığını 100°C’den fazla geçmeyecek kadar ısıtılarak temiz standart bir kaba aktarılır. Numune kabına aktarılan bitüm içerisinde hava kabarcığı kalmamasına dikkat edilerek üzeri bir beher ile kapatılarak soğumaya bırakılır. Ortam sıcaklığında 1-1,5 saat bekleyen numune 25°C’deki su banyosuna koyularak 1-1,5 saat süre

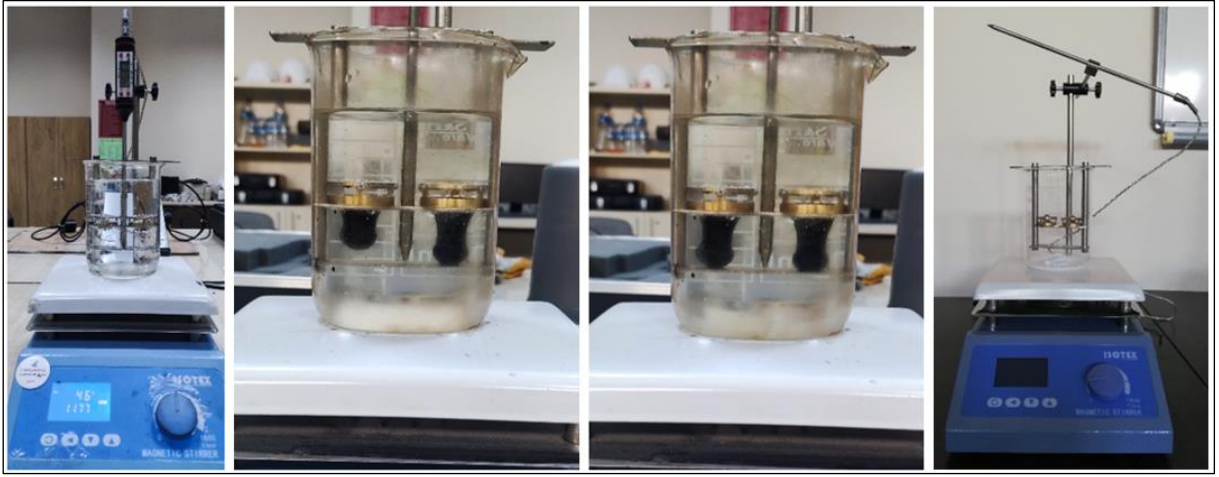
suda bekletilir ve ardından penetrasyon deneyine tabi tutulur. İğnelerin numune üzerinde en az bir cm uzunluğa sahip eşkenar üçgen oluşturulacak şekilde 3 noktaya batırılması sağlanarak değerler okunur. Milimetre cinsinden okunan 3 değerın ortalaması alınarak bitümün penetrasyon değeri belirlenmiş olur. Penetrasyon değeri düştükçe bitümün sertliği artmaktadır (Anonymous, 2021). Şekil 16’da penetrasyon deneyi verilmiştir.



Şekil 16. Penetrasyon deney cihazı

Yumuşama noktası deneyi

Bitümlü bağlayıcılar sıcaklıkları arttıkça daha viskoz bir hale geçerler ve diğer katı maddeler gibi belirli bir erime noktaları yoktur. Bu sebeple yumuşama noktası deneyi bitümlü bağlayıcıların hangi sıcaklıkta yumuşayarak aktığını belirlemek amacıyla TS EN 1427 standardına göre yapılmaktadır. Deney numunesi TS EN 12594’e göre hazırlanarak pirinç halkalar içerisine doldurulur. Ortam sıcaklığında 30 dakika bekletilen numuneler behere alınarak buzlu suda 5°C’ye kadar soğutulur. 15 dakika boyunca bu sıcaklık korunmalıdır. Ardından numunelerin üzerine standart bilyeler yerleştirilerek su dolu beher içerisinde manyetik karıştırıcıya koyularak eşit bir şekilde ısıtılması sağlanır. Bilyenin ağırlığı altında numunelerin sarkarak alt plakaya değdiği andaki sıcaklık değeri okunur. Değerler arasındaki fark 1°C’den fazla ise deney tekrarlanır, değilse ortalamaları alınarak yumuşama noktası belirlenir (Anonymous, 2021). Şekil 17’de Yumuşama noktası deneyi gösterilmiştir.



Şekil 17. Yumuşama noktası deney düzeneği

Penetrasyon indeksi

Penetrasyon indeksi bitümün ısıya karşı duyarlılığını ifade etmek için kullanılmaktadır. Isıya çok duyarlı bitümler ile yapılan karışımların düşük sıcaklıklarda oluşan çatlamalara ve kalıcı deformasyona olan direnci ısıya az duyarlı bitüm ile hazırlanan karışımlara göre daha düşüktür (Firoozifar *et al.* 2011). Penetrasyon indeksi bitüme yapılan penetrasyon ve yumuşama noktası deneylerinden elde edilen veriler ile aşağıdaki formüle göre hesaplanmaktadır.

$$A = \frac{\log 800 - \log P_{25}}{T_{YN} - 25}$$

$$PI = \frac{20 - 500 * A}{1 + 50 * A}$$

Verilen formüllerde P_{25} , 25°C’de bitümün penetrasyonudur, T_{YN} ise bitümün yumuşama noktasıdır. Hesaplanan Penetrasyon indeksi (PI) değerleri arttıkça ısıya karşı duyarlılık azalmaktadır. Penetrasyon indeksi 2’den büyük olan bitümlerde ısıya duyarlılık düşük, -2’den küçük olan bitümlerde ise ısıya duyarlılık yüksektir (Keyf, 2010).

Parlama noktası deneyi

Bitümlü bağlayıcıların yapısında bulunan uçucu bileşiklerin, hidrokarbonların ve yağların yüksek sıcaklıklarda buharlaşıp hava ile karşılaşarak yanıcı gazlar oluştururlar. Bu gazlar alev alarak parlama meydana gelmesine sebep olurlar. Bitümlü bağlayıcıların güvenli bir şekilde karıştırılması, depolanması, uygulaması için ilk parlamanın meydana geleceği sıcaklığı bilmek tutuşma ve yangın tehlikelerine karşı çok önemlidir. Bu sebeple Parlama noktası deneyleri yapılmaktadır (Anonymous, 2021). Karayolları teknik şartnamesine göre parlama noktası minimum 220°C olmalıdır (Anonymous, 2013). Parlama noktası deneyi için ısıtılan

bitüm parlama noktası kabına çentikle işaretlenen kısma kadar hava kabarcığı oluşmamasına dikkat edilerek doldurulur. Başlangıçta sıcaklık dakikada 5-17°C artacak şekilde ısıtılmalıdır. Daha sonra sıcaklık beklenen parlama noktasının 28°C altına ulaştığında, sıcaklık artış hızı dakikada 5-6°C artacak şekilde ayarlanmalıdır. Test alevi numunenin üzerinden geçirilerek parlama oluştuğu andaki sıcaklık değeri okunur bu değer parlama noktası değeri olarak alınır (Anonymous, 2012). Parlama noktası deneyi Şekil 18’de gösterilmiştir.



Şekil 18. Parlama noktası deney cihazı

Dönel ince film halinde ısıtma deneyi ve kütle kaybı

Bitümlü bağlayıcıların depolanması, plent merkezlerine taşınması, plent merkezlerinde agregalar ile karıştırılması, uygulama yerine taşınması, serilmesi ve ardından sıkıştırılması işlemleri sırasında bitüm hem sıcaklığın hem de havada bulunan oksijenin etkisiyle kısa dönem yaşlanmaktadır. Bu kısa dönem yaşlanma özelliklerini belirlemek amacıyla dönel ince film halinde ısıtma deneyi yapılmaktadır. Yaşlanma sonrası bitümün penetrasyon, yumuşama noktası gibi fiziksel özellikleri ve kütle kaybı belirlenmektedir. Şekil 19’da sırasıyla RTFOT cihazı, numuneler ve deneye tabii tutulan numunenin tartımı verilmiştir.



Şekil 19. RTFOT cihazı ve numuneleri

Deney için öncelikle sekiz adet temiz cam kap numaralandırılarak tartılır. Tartılan kapların darası alınarak akışkan hale getirilene kadar ısıtılan bitümden 35 gram doldurulur. Sonrasında cam kap ağırlığı ile birlikte tekrar tartılır. Önceden 163°C sıcaklığa ayarlanmış RTFOT cihazı içerisine cam kaplar sırasıyla yerleştirilir. Cihaz standart olarak dakikada 15 devir hızında, numuneleri döndürmektedir. Cihazda bulunan hava kanalı numuneler içerisine her turda dakikada 4 litre hızda hava vermektedir. 85 dakika sonra numuneler cihazdan çıkarılarak tartım işlemleri yapılır. Numunelerden altı tanesi yaşlanma sonrası fiziksel özelliklerin belirlenmesi için penetrasyon ve yumuşama noktası deney kalıplarına doldurulmak üzere alınır. Diğer iki numune ise kütle kaybı hesabı için bir saat oda sıcaklığında soğutulmuş olarak tekrardan tartılır. Aşağıda verilen denklem kullanılarak kütle kaybı yüzde cinsinden hesaplanmaktadır.

$$\text{Kütle kaybı (\%)} = \frac{M_2 - M_1}{M_1 - M_0}$$

Denklemden; M_0 cam kabın boş ağırlığı, M_1 deney öncesi numune dolu cam kabın ağırlığı, M_2 ise deney sonrası soğuyan numune dolu cam kabın ağırlığını ifade etmektedir.

Elastik geri dönme deneyi

Elastik geri dönme deneyi bitümün elastik özelliklerini değerlendirmek amacıyla yapılmaktadır. TS EN 13398 standardına göre yapılan bu deneyde bitüm akışkan hale gelene kadar ısıtılarak numune kalıplarına dökülür. 60 dakika oda sıcaklığında bekletildikten sonra kalıp hizasını geçen fazla bitüm varsa ısıtılmış bir spatula yardımıyla alınır. Sonra 25°C’de bulunan su banyosuna koyularak 90 dakika bekletilir. Su banyosundan çıkarılan kalıpların alt plakası çıkartılır ve elastik geri dönme deney cihazına yerleştirilir. 25°C deney sıcaklığında 50 mm/dk hızla numunelerin boyu 200 mm uzama gösterene kadar çekilir ve orta noktasından numuneler ikiye kesilerek iplikler oluşturulur. 30 dakika beklendikten sonra kesilen iplikler arasında oluşan mesafe mm olarak ölçülür. Aşağıda verilen şekilde elastik geri dönme cihazı (veya düktilite cihazı) ve ortadan kesilerek oluşturulan iplikler verilmiştir.



Şekil 20. Elastik geri dönme deney cihazı ve numuneleri

Her numune için ölçümler yapıldıktan sonra aşağıda verilen denklem kullanılarak elastik geri dönme değerleri hesaplanmaktadır.

$$R_E = \frac{d}{L} * 100$$

Burada; R_E elastik geri dönme değerini, d iplikler arasında mm olarak ölçülen mesafeyi, L ise germe uzunluğudur. L deney standardına göre 200 mm olmalıdır ancak 200 mm'den önce ipliklerde kopma meydana gelirse kopma sırasındaki uzunluk L olarak alınmaktadır. Üç numune ile yapılan deneyde R_E değerleri arasındaki fark %5'ten az ise bu değerlerin ortalaması alınır ve bu elastik geri dönme değeri olarak kullanılır.

Marshall stabilite ve akma deneyi ile tasarım

Marshall stabilite ve akma deneyinde deformasyona karşı maksimum yük stabiliteyi, maksimum yük uygulandığı anda numunede oluşan deformasyon miktarı ise akma değerini ifade etmektedir. Deneyin yapılış amacı stabilite ve akma miktarını belirlemenin yanı sıra optimum bitüm oranını belirlemektir. Çalışmada TS EN 12697-34 standardı kullanılarak Marshall deneyleri yapılmıştır. Numunelerin hazırlanması için gradasyona uygun olarak 1150 gram agrega kullanılır. Optimum bitüm miktarının tayini için ise ağırlıkça %3,5, %4, %4,5, %5, %5,5, %6, %6,5 oranında bitüm agregalar ile karıştırılarak her oran için 3 adet numune üretilir. Deney numuneleri hazırlanması sırasında kullanılacak olan bütün araç gereçler, agregalar, bitümler ve numune kalıpları etüvde karıştırma sıcaklığında ısıtılır. Şekil 21'de çalışmada kullanılan etüvlerden biri gösterilmiştir.



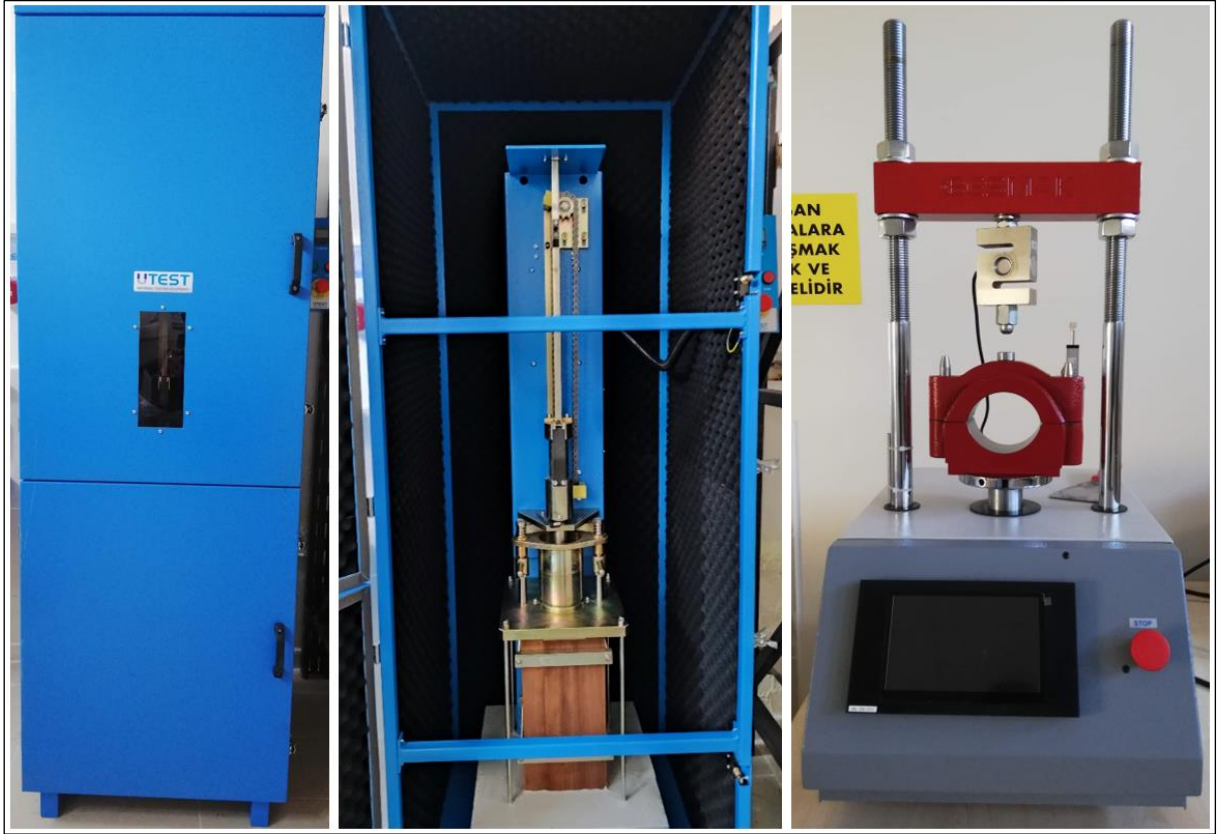
Şekil 21. Etüv cihazı

Karayolları teknik şartnamesine göre agregalar numune hazırlanmasından 24 saat önce, bitümler ise 3 saat önce etüve yerleştirilmelidir. Isınan agregalar karıştırma kabına alınarak belirtilen oranlarda bitümler ilave edilerek mikserde karıştırılır. Şekil 22’de deneylerde kullanılan mikser, su banyosu ve kriko verilmiştir.



Şekil 22. Çalışmada kullanılan mikser, su banyosu ve numune krikosu

Homojen bir şekilde oluşturulan karışım numune kabına aşamalı olarak şişlenerek doldurulur. Marshall tokmak ile numunenin her iki yüzeyine 75 vuruş yapılarak sıkıştırma sağlanır. Sıkıştırılan numuneler 3 saat sonra kriko ile çıkarılarak çapakları törpülenir ve kumpasla 3 noktadan yükseklikleri ölçülür. Boşluk oranlarının belirlenebilmesi için her numunenin kuru yüzey, sudaki ve suya doymun kuru yüzey ağırlıkları ölçülür. Deney öncesinde numuneler 60°C sıcaklığa sahip su banyosunda 30 dakika bekletilir. Su banyosundan çıkarılan numunelerin deneyleri yaklaşık 20 saniye içerisinde tamamlanması gerekmektedir. Çalışmada kullanılan Marshall kompaktör ve Marshall stabilite cihazı Şekil 23’de verilmiştir.



Şekil 23. Marshall kompaktör ve stabilite cihazları

Marshall stabilite test cihazına yerleştirilen numunelerin yük/deformasyon bilgileri kaydedilir. Maksimum yük değeri ve bu değere karşılık gelen deformasyon bilgileri ile stabilite ve akma değerleri hesaplanır. Stabilite düzeltme katsayıları aşağıda verilen denklem ile hesaplanmaktadır.

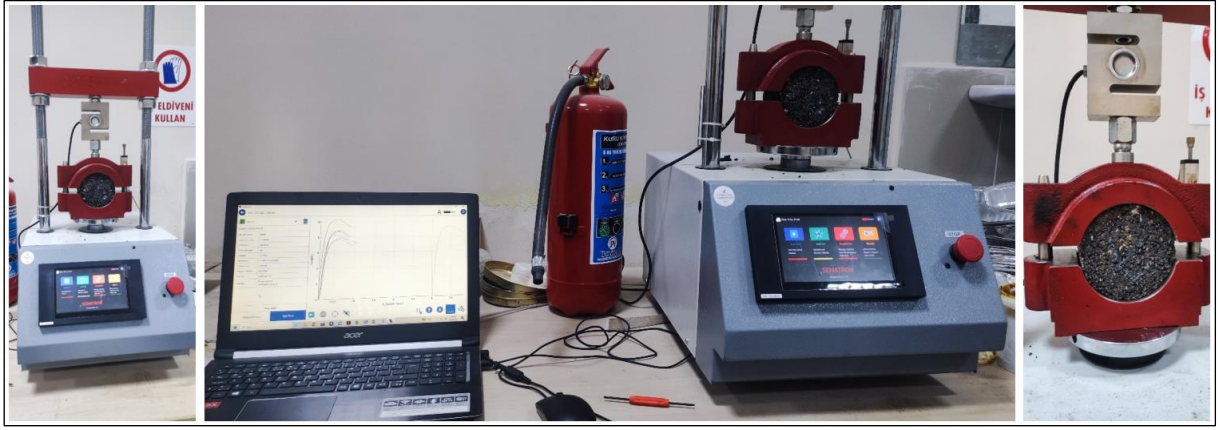
$$c = 5,24 * e^{-0,0258*h}$$

Burada;

c= Düzeltme katsayısı

h= numunenin ortalama yüksekliğidir.

Numune karışımının sertliğini ve deformasyona karşı olan direncini ifade etmek için Marshall oranı (MQ) belirlenmektedir. Marshall oranı düzeltilmiş stabilite değerinin akma değerine bölünmesi ile bulunmaktadır (Yılmaz and Kök, 2009). Şekil 24'te Marshall stabilite ve akma deneyi verilmiştir.



Şekil 24. Marshall Stabilite ve akma deneyi

Numunelerin özgül ağırlığı AASHTO T166, ASTM D2041 standartlarına göre aşağıda verilen denklem ile hesaplanmaktadır. Denklemde; G_{mb} numunenin özgülü ağırlığı, A numunenin kuru ağırlığı, B doymun yüzey kuru ağırlığı, C ise numunenin sudaki ağırlığıdır.

$$G_{mb} = \frac{A}{B - C}$$

Bitümlü karışımlar içerisindeki hava boşluğu kaplamanın dayanıklılığını doğrudan etkilemektedir. Ayrıca hava boşluğu fazla olan bitümlü karışım uygulamalarında geçirgenlik miktarı artmaktadır. Hava boşluğu çok az olanlarda ise tekerlek izi ve ötelenme gibi kalıcı deformasyon yapma eğilimi artmaktadır. Bu sebeplerden dolayı bitümlü sıcak karışım uygulamalarında boşluk oranının belirli bir aralıkta olması istenir. Karayolları teknik şartnamesinde boşluk oranının %4 ile %6 arasında olması istenmektedir. Boşluk oranı aşağıda verilen denklem yardımı ile hesaplanmaktadır. Denklemde V_h yüzde olarak hava boşluğunu, D_p sıkıştırılmış karışımın hacim özgül ağırlığını (pratik yoğunluk), D_t ise bitümlü karışımın teorik maksimum özgül ağırlığını ifade etmektedir.

$$V_h(\%) = \frac{V_{hava}}{V_{toplam}} * 100 = 100 - \frac{100 * D_p}{D_t}$$

Sıkıştırılmış karışımın hacim özgül ağırlığı D_p ile gösterilir ve aşağıda verilen denklem ile hesap edilmektedir. Denklemde W_{agrega} agreganın ağırlığını, $W_{bitüm}$ bitümün ağırlığını, V_{toplam} ise toplam hacmi ifade etmektedir.

$$D_p = \frac{W_{agrega} + W_{bitüm}}{V_{toplam}}$$

Teorik maksimum özgül ağırlık D_t ile gösterilir ve aşağıda verilen denklem ile hesap edilmektedir. Denklemde W_{agrega} agreganın ağırlığını, $W_{bitüm}$ bitümün ağırlığını, V_{se} bitümlü karışım içerisindeki agreganın efektif ağırlığına esas olan hacmi, $V_{bitüm}$ bitümün hacmini, G_{eff}

agreganın efektif özgül ağırlığını, w_a bitümlü karışım içerisindeki bitüm ağırlığının agrega ağırlığına yüzde oranını, G_b ise bitümün özgül ağırlığını ifade etmektedir.

$$D_t = \frac{W_{agrega} + W_{bitüm}}{V_{se} + V_{bitüm}} = \frac{100 + w_a}{\frac{100}{G_{eff}} + \frac{w_a}{G_b}}$$

Agregalar arası boşluk V_{MA} ile gösterilir ve aşağıda verilen denklem ile hesap edilmektedir. Denklemde V_a Numunedeki agraga hacminin yüzdesini, V_h boşluk yüzdesini, V_b numunedeki efektif bitüm hacminin yüzdesini ifade etmektedir.

$$V_{MA} = 100 - V_a = V_h + V_b$$

Bitümle dolu boşluk oranı V_{FA} ile gösterilir ve aşağıda verilen denklem ile hesap edilmektedir. Denklemde V_{MA} agregalar arası boşluğun yüzdesini, V_b ise numunedeki efektif bitüm hacminin yüzdesini ifade etmektedir.

$$V_{FA} = \frac{V_b}{V_{MA}} * 100$$

Çalışmada optimum bitüm miktarının tayini için ağırlıkça %3,5, %4, %4,5, %5, %5,5, %6, %6,5 oranında bitüm agregalar ile karıştırılarak her oran için 3 adet numune üretilmiştir. Optimum bitüm miktarı hesap edildikten sonra bu bitüm oranı ile 3 adet numune daha dökülmüş ve şartname sınırlarına uygunluğu kontrol edilmiştir. Ardından deney planına göre hazırlanmış 16 modifiye bitüm karışımı ile üçer adet numune dökülerek her karışım için stabilite, akma, boşluk oranları belirlenmiştir. Çalışmada deneye tabii tutulan numunelerin görseli Şekil 25'te verilmiştir.



Şekil 25. Marshall stabilite ve akma deneyi uygulanan numuneler

Yarım daire eğilme deneyi (Semi circular bending - SCB)

Bitümlü karışımların düşük sıcaklıkta kırılma özelliklerinin değerlendirilmesi amacıyla SCB deneyi yaygın olarak kullanılmaktadır (Yılmaz, 2011; Yılmaz, 2013; Çeloğlu, 2020). Yarım daire şeklinde çentikli numuneye sabit deformasyon hızlı yükleme yapılarak numunenin kırılması sağlanmaktadır. Kırılma tokluğunu hesap etmek için aşağıda verilen denklemler kullanılmaktadır.

$$\sigma_{mak} = \frac{4,263 * P_{mak}}{D * t}$$

$$K_{IC} = \sigma_N \sqrt{\pi a} f(a/W)$$

$$f\left(\frac{a}{W}\right) = -4,9965 + 155,58\left(\frac{a}{W}\right) - 799,94\left(\frac{a}{W}\right)^2 + 2141,9\left(\frac{a}{W}\right)^3 - 2709,1\left(\frac{a}{W}\right)^4 + 1398,6\left(\frac{a}{W}\right)^5$$

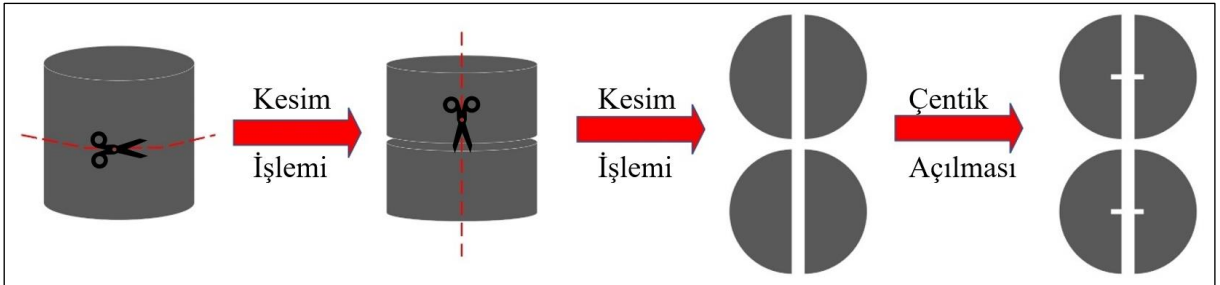
Denklemlerde çentik boyu a, numune yüksekliği W, yük P, gerilme σ , numune çapı D, numunenin kalınlığı t ve kırılma tokluğu ise K_{IC} ile gösterilmiştir. $f\left(\frac{a}{W}\right)$ Fonksiyonu ise numunenin geometrik faktörünü vermektedir.

Yarım daire eğilme deneyi (SCB) numunesi üretmek için yoğurmalı sıkıştırıcı (gyratory kompaktör) kullanılmaktadır. Yoğurmalı sıkıştırıcı 1,25° iç açı ile dönerek numuneyi sıkıştırmaktadır. Kalıp eksenine dik doğrultuda 600 kPa basınç uygulamaktadır Şekil 26'da yoğurmalı sıkıştırıcı verilmiştir. Cihazda numunelerin kalıptan çıkarılmasına olanak veren bir pistonunda bulunmaktadır.



Şekil 26. Yoğurmalı sıkıştırıcı (Gyratory)

Numune dökümü ve sıkıştırılması sırasında kullanılacak bütün araç ve gereçler etüvde önceden ısıtılmalıdır. Agrega ve bitüm karıştırılırken numune kalıbı ve alt plakası çıkarılıp yağlanır. Karışım numune kalıbına şişlenerek doldurulur ve yoğurmalı sıkıştırıcıya yerleştirilerek sıkıştırma işlemine başlanır. Numune soğuduktan sonra yoğurmalı sıkıştırıcıda bulunan piston yardımıyla numune çıkarılır. Öncelikle numunenin kuru yüzey ağırlık, doymun yüzey ağırlık ve kuru yüzey doymun ağırlığı belirlenerek hava boşluğu hesaplanır. Numuneler bu işlemlerin ardından beton testeresi yardımıyla önce orta yükseklikten kesilerek iki silindir elde edilmiştir. Daha sonra bu silindirler çaplarından ayrı boyuna doğrultuda kesilmiş ve 4 adet yarım daire elde edilmiştir. SCB numunelerinin elde edilmesine ait görsel Şekil 27’de verilmiştir.



Şekil 27. SCB numunesinin oluşturulma aşamaları

Çalışmada yarım daire haline gelen numunelere düzgün bir şekilde çentik açılması için düzenek hazırlanmıştır. Hazırlanan düzenekte numune sadece düşey doğrultuda hareket edebilen makaralı bir düzleme sabitlenmektedir. Kesici ise hem düşey hem yatay doğrultuda

hareketsiz kalacak şekilde sabitlenmiştir. Şekil 28’de hazırlanan düzeneğin görseli verilmiştir. Makara çevrilerek numunenin olduğu düzlem hareket ettirilip numunenin tam ortasına 15 mm derinliğinde düz bir çentik açmaktadır.

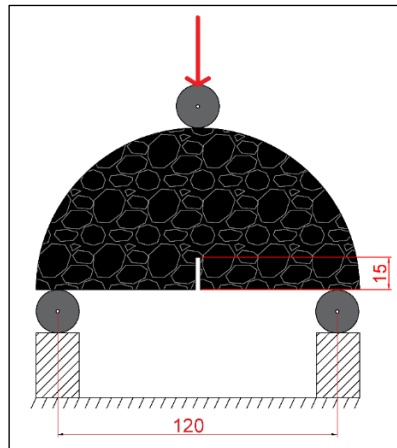


Şekil 28. Çentik açmak için kullanılan düzenek

SCB deneyinde her karışım için 3 adet numune dökülür ve bunların ortalama kırılma toklukları hesap edilmektedir. Çalışmada 0°C ve -20°C olmak üzere iki farklı sıcaklıkta SCB deneyi yapılmıştır. Deney planına göre hazırlanan 16 karışım kullanılarak her karışım için 6 numune üretilmiştir. Üretilen numunelerin görselleri Şekil 29’da verilmiştir.

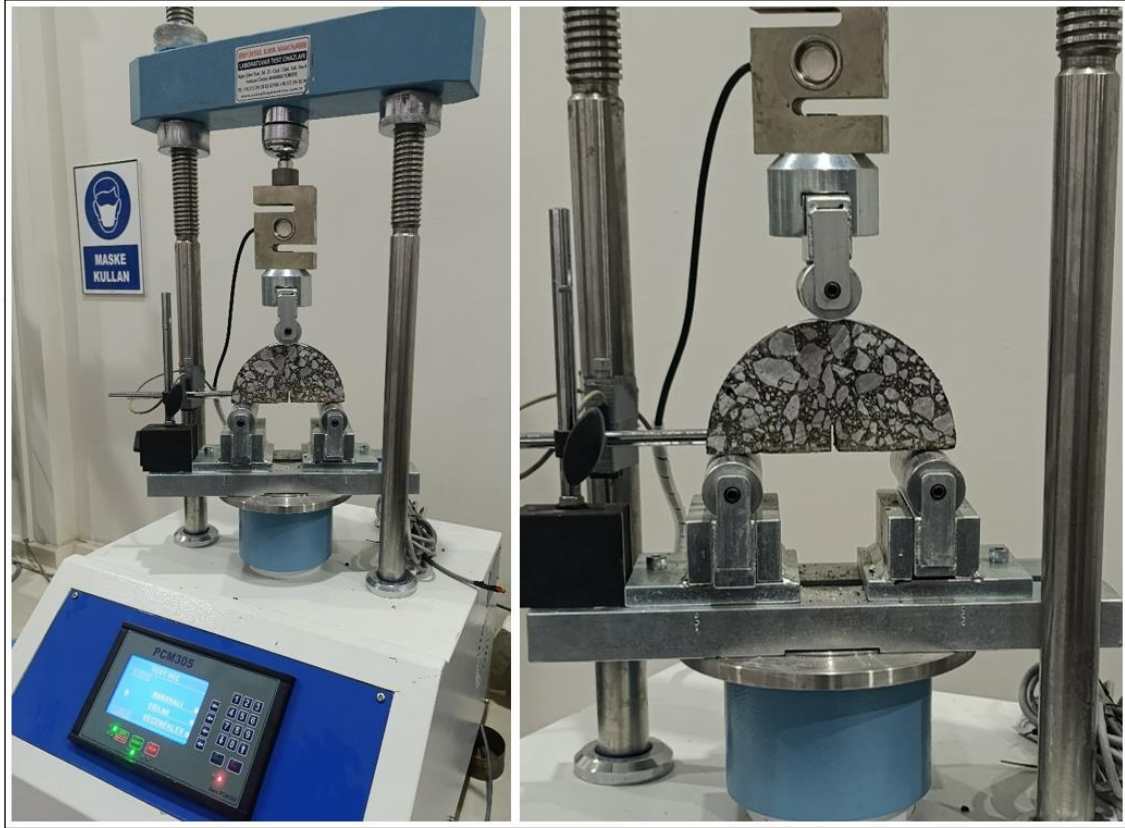


Şekil 29. SCB deney numuneleri



Şekil 30. SCB deney düzeneği

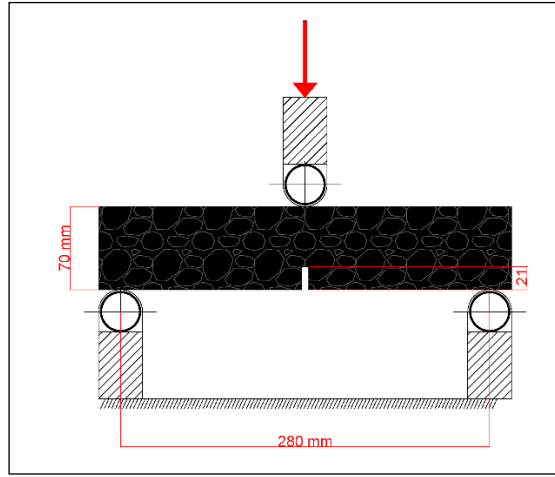
SCB deneyi, 50KN kapasiteli ve yükleme hızı ayarlanabilen Marshall Stabilite test cihazı kullanılarak yapılmıştır. Bu cihazı SCB testine uygun hale getirmek için mesnetler arası ayarlanabilen bir 3 noktalı eğilme aparatı yaptırılmıştır. Şekil 30'da deney düzeneğinin basit çizimi verilmiştir. Mesnetler arası 120 mm olmalıdır ve yük orta noktadan uygulanmalıdır. Şekil 31'de SCB deneyine uygun hale getirilen Marshall test cihazı ve deney düzeneği verilmiştir.



Şekil 31. SCB deneyi

Kiriş eğilme deneyi (Single-Edge Notched Beam - SENB)

Kiriş eğilme deneyi bitümlü sıcak karışımların kırılma tokluklarının belirlenmesinde sık kullanılan deneylerden biridir. Diğer deney yöntemlerinden farklı olarak Mod I tipi kırıl türünde stabil çatlak büyümesinin izlenebilmesi mümkündür. Kiriş numuneler kırılma tokluğu deneylerinde bitümlü sıcak karışımlarda sıklıkla kullanılmasına rağmen standart bir deney yöntemi bulunmamaktadır. Çalışmada numune boyutu için literatürde sıklıkla kullanılan 300*50*70 mm ölçüleri seçilmiştir. Seçilen ölçülere göre deney düzeneği Şekil 32'de verilmiştir.



Şekil 32. SENB Deney düzeneği ve numune boyutları (Yılmaz, 2013)

$$K_{IC} = \frac{PS}{bW^2} * f\left(\frac{a}{W}\right)$$

$$f\left(\frac{a}{W}\right) = \frac{3\left(\frac{a}{W}\right)^{0,5} \left\{ 1,99 - \frac{a}{W} \left(1 - \frac{a}{W}\right) \left[2,15 - 3,93 \left(\frac{a}{W}\right) + 2,7 \left(\frac{a}{W}\right)^2 \right] \right\}}{2 \left(1 + 2 \left(\frac{a}{W}\right)\right) \left(1 - \frac{a}{W}\right)^{1,5}}$$

Verilen denklemde K_{IC} kırılma tokluğunu, P uygulanan kırılma yükünü, S mesnetler arası mesafeyi, b numunenin kalınlığını, W numune yüksekliğini, a ise çentik derinliğini göstermektedir. Verilen denklemler kullanılarak SENB deneyinde kırılma tokluğu değeri hesap edilmektedir (Hoare and Hesp, 2000; Marasteanu *et al.* 2004; Artamendi and Khalid, 2006; Marasteanu *et al.* 2007).

Bazı araştırmacılar kiriş numuneyi sıkıştırmak için merdaneli sıkıştırıcı kullanmışlardır ve merdaneli sıkıştırıcıda 305*305*50 mm ölçülerinde sıkıştırılan numune kesilerek 300*50*70 mm ölçülerinde deney numuneleri elde edilmiştir (Yılmaz, 2013). Bu çalışmada 300*50*70 mm ölçülerinde deney numuneleri üretmek için farklı bir yaklaşım ortaya koyulmuştur. Lim (1995) tarafından da kullanılan Enerji/Hacim formülü ile kiriş numune üretmek için yeni bir kompaktör tasarımı yapılmıştır. Marshall kompaktör ile kiriş kompaktörünün Enerji/Hacim değerleri eşit olacak şekilde hesaplamalar yapılmıştır. Enerji/Hacim denklemi (Lim *et al.* 1995) aşağıda verilmiştir.

$$\frac{\text{Enerji}}{\text{Hacim}} = \frac{W_{t1} * H_{t1} * n_1}{\frac{\pi}{4} * D^2 * H_N} = \frac{W_{t2} * H_{t2} * n_2}{B * L * W}$$

Denklemden marshall kompaktör tokmak ağırlığı W_{t1} , marshall tokmağın numune üzerine serbest düşme yüksekliği H_{t1} , marshall tokmağın vuruş sayısı n_1 , marshall numune çapı D , marshall numune yüksekliği H_N , kiriş kompaktör tokmak ağırlığı W_{t2} , kiriş tokmağının

serbest düşme yüksekliği H_{t2} , kiriş tokmağının vuruş sayısı n_2 , kiriş numunenin yüksekliği B , uzunluğu L ve yüksekliği W olarak gösterilmiştir. Marshall kompaktörün kolay bir şekilde modifiye edilerek kiriş tokmağına çevrilebilmesi için tokmağın serbest düşme yüksekliği değiştirilmemiştir. Tokmak ağırlığı değiştirilmediği takdirde vuruş sayısı artmaktadır ve sıkıştırma süresi buna bağlı olarak uzamaktadır. Süre uzadıkça numune soğuyacağı için yeterli sıkışma sağlanamayacaktır. Bu sebeple vuruş sayısı marshall deneyi ile aynı alınmış tokmak ağırlığı değiştirilmiştir. Verilen denklemde tokmakların serbest düşme yükseklikleri ve vuruş sayıları eşit alınarak hesaplamalar yapıldığında kiriş tokmak için ağırlığın 9260 gram olması gerektiği hesap edilmiştir. Tasarlanan kiriş kompaktöründe 9260 gram ağırlığındaki tokmak 457 mm yükseklikten 75*2 sefer düşmesiyle numune sıkıştırılmaktadır. Kiriş kompaktör olarak modifiye edilen marshall kompaktörün görseli Şekil 33'te verilmiştir.



Şekil 33. Kiriş numune kompaktörü

Kiriş numune kompaktörü istenildiği zaman marshall kompaktöre kolaylıkla çevrilebilecek şekilde tasarlanmıştır. Bu yönü ile hem marshall numunelerinin hem de kiriş numunelerin hazırlanmasına olanak sağlamasının avantajlı bir durum olduğu düşünülmektedir. Kiriş numunelerin kalıpları ise 300*70*70 iç ölçülere sahip olacak ve sökülüp takılabilecek şekilde tasarlanmıştır. Ayrıca kompaktör tabanlarında marshall numunelerin tam yerleştirilebilmesini sağlayan 3 tane kılavuz pimleri bulunmaktadır. Marshall kalıplarının dış

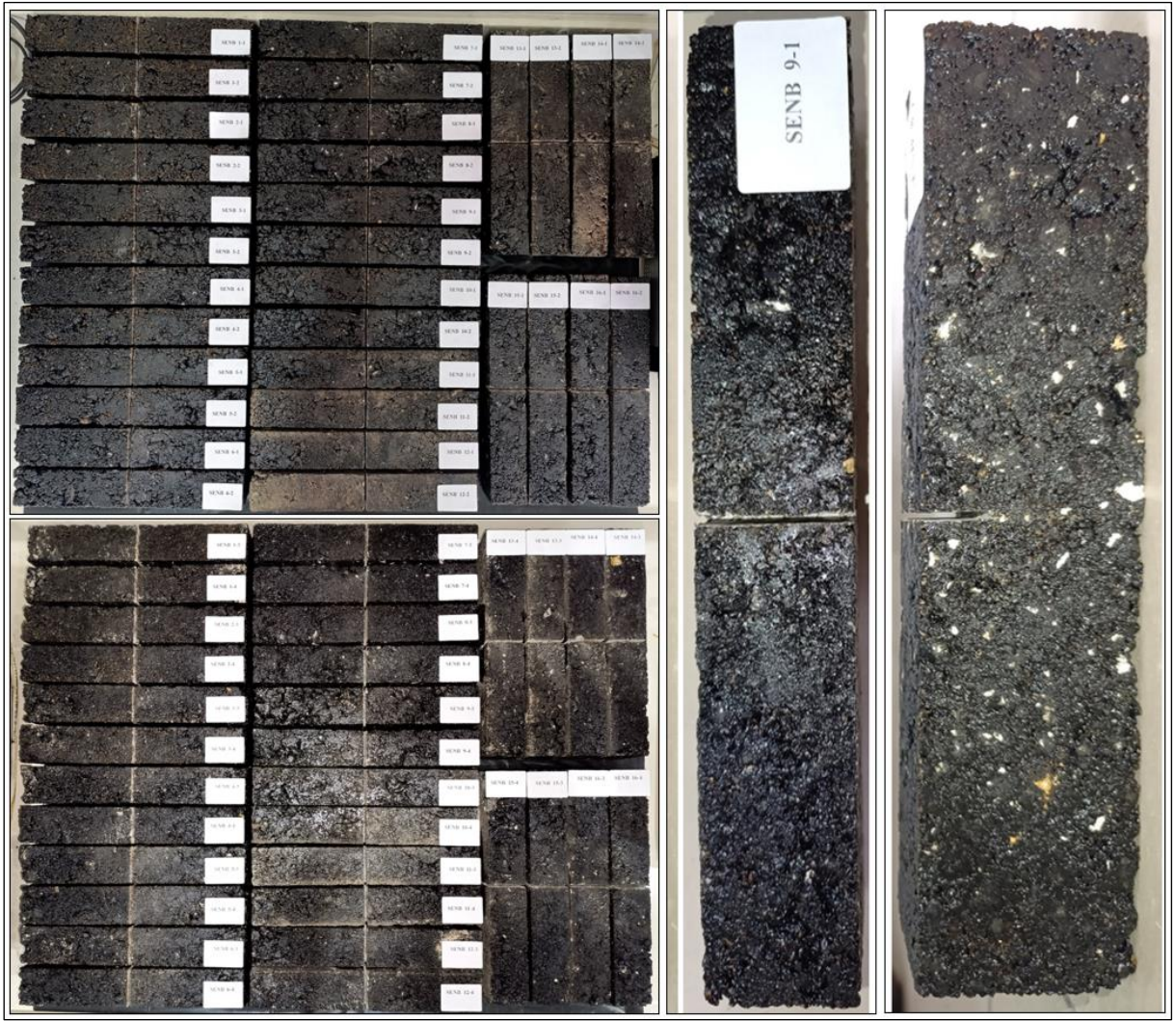
kısımları bu pimlere dayandırılarak koyulmaktadır. Kiriş numune kalıplarında ise bu pimler kalıba geçecek şekilde kalıp tabanına yuvalar açılmıştır. Bu sayede kiriş kalıpları pimler üzerine oturmakta ve sıkıştırma süresince sabit kalmaktadır.

SENB deneyi ile kırılma tokluğunun belirlenmesi için 300*50*70 mm ölçülerindeki numunelere 21 mm derinliğe sahip çentikler açılmaktadır. SENB deneyi, 50KN kapasiteli ve yükleme hızı ayarlanabilen Marshall Stabilite test cihazı kullanılarak yapılmıştır. Bu cihazı SENB testine uygun hale getirmek için mesnetler arası ayarlanabilen bir 3 noktalı eğilme aparatı yaptırılmıştır. Mesnetler arası 280 mm olmalıdır ve yük orta noktadan uygulanmalıdır. Şekil 34'te SENB deneyine uygun hale getirilen Marshall test cihazı ve deney düzeneği verilmiştir.



Şekil 34. SENB deneyi

SENB deneyinde her karışım için 3 adet numune dökülmüştür ve bunların ortalama kırılma toklukları hesap edilmiştir. Çalışmada 0°C ve -20°C olmak üzere iki farklı sıcaklıkta SCB deneyi yapılmıştır. 2 Farklı sıcaklıkta deneyler yapıldığı için deney planına göre hazırlanan 16 karışım kullanılarak her karışım için 6 adet numune üretilmiştir. Üretilen numunelerin görselleri Şekil 35'te verilmiştir.



Şekil 35. SENB deney numuneleri

Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FTIR)

Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi, malzemelerin kimyasal içeriklerini, moleküler yapılarını, bağları ve fonksiyonel grupları tanımlamak ve bileşiklerin kimyasal olarak aynı olup olmadığını saptamak için kullanılmaktadır. Kızılötesi ışınlar gönderilen numunedeki kimyasal bağlar; titreşim ve dönme hareketleri ile ışınların bir kısmını absorbe ederler. Bu absorbe miktarlarına göre numune yapısındaki kimyasal bağlar ve fonksiyonel gruplar belirlenir.

Geçirimli elektron mikroskobu (TEM)

Geçirimli elektron mikroskobu ince bir film halinde alınan numune içerisinden yüksek enerjili elektronlar geçirilerek aktif bir yüzeye düşürülmesiyle yüksek çözünürlüklü görüntüler üreten bir mikroskoptur. TEM ile numunelerin iç yapısı atomik ve moleküler düzeyde incelenerek yapısal, morfolojik ve bileşen özellikleri belirlenebilmektedir.

ARAŞTIRMA BULGULARI

Taguchi metodu L16 ortogonal dizisine sahip 4 parametre, 4 seviye içeren deney planına göre hazırlanan modifiye bitümler ve bu bitümler ile yapılan deney sonuçları bu bölümde verilecektir. Her deney için performans istatistikleri, ANOVA varyans analizleri ve optimum oran tahminleri verilmiştir.

RTFOT Öncesi Penetrasyon Deneyi Sonuçları

Deney planına göre hazırlanan modifiye bitümlerin ince film halinde ısıtma deneyine tabi tutulmadan önce (RTFOT öncesi) penetrasyon deneyleri yapılmıştır. Optimum deney sonucunun maksimum olması istenilen durum için en büyük-en iyi performans istatistiği seçilerek Taguchi yöntemi ile S/N değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan S/N değerleri ve penetrasyon deney sonuçları Tablo 7’de verilmiştir.

Tablo 7. RTFOT Öncesi Penetrasyon Deney Sonuçları ve S/N Değerleri

Deney No	1. Numune (0.1mm)	2. Numune (0.1mm)	3. Numune (0.1mm)	Ortalama (0.1mm)	S/N
1	88,60	90,40	89,70	89,57	39,04
2	93,60	94,30	93,80	93,90	39,45
3	107,80	108,50	107,20	107,83	40,66
4	128,70	128,90	128,50	128,70	42,19
5	77,80	79,10	80,20	79,03	37,96
6	99,40	98,60	100,20	99,40	39,95
7	110,40	113,90	114,50	112,93	41,06
8	139,20	140,30	140,70	140,07	42,93
9	91,70	91,40	94,40	92,50	39,32
10	107,10	107,20	106,70	107,00	40,59
11	113,40	113,60	112,70	113,23	41,08
12	122,50	122,90	123,00	122,80	41,78
13	79,90	80,10	79,80	79,93	38,05
14	94,90	95,00	98,00	95,97	39,64
15	82,90	84,60	84,20	83,90	38,48
16	109,40	110,20	109,80	109,80	40,81

S/N değerleri hesaplandıktan sonra parametrelerin seviyelere göre ortalama S/N değerleri hesap edilmiştir. Ortalama S/N değerleri Tablo 8’de verilmiştir. Tablo incelendiğinde,

GNP'nin 3.seviyesi (A3), yağın 4.seviyesi (B4), sıcaklığın 3.seviyesi (C3) ve sürenin 1. Seviyesi (D1) en yüksek ortalama S/N etkilerine sahiptir.

Tablo 8. RTFOT Öncesi Penetrasyon Deneğinde Ortalama S/N Etkileri

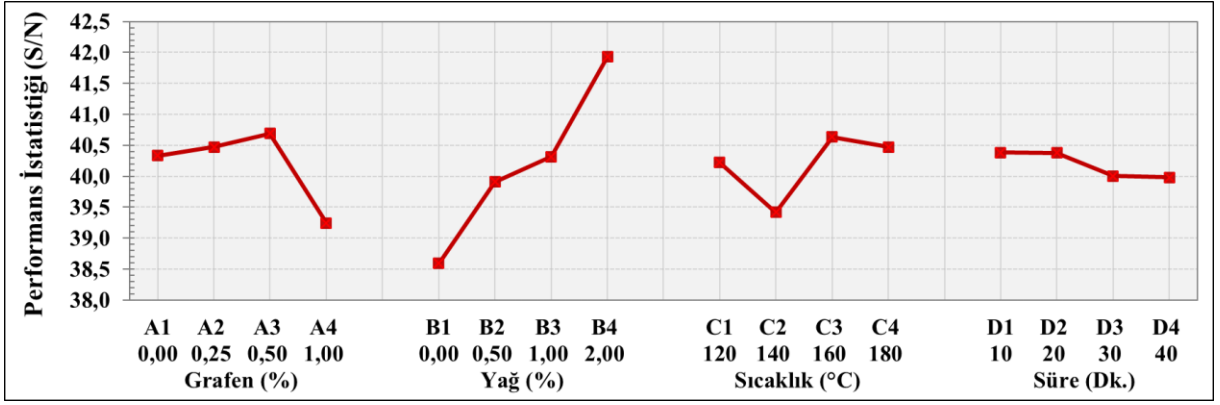
Ortalama S/N Etkileri				
	Grafen	Yağ	Sıcaklık	Süre
1. Seviye	40,336	38,594	40,221	40,381
2. Seviye	40,472	39,908	39,417	40,379
3. Seviye	40,693	40,317	40,637	40,003
4. Seviye	39,246	41,929	40,473	39,984

Ortalama S/N etkileri belirlendikten sonra her bir parametrenin S/N'e olan katıları bulunarak RTFOT öncesi penetrasyonun performans tahminleri yapılmıştır. Performans tahminleri Tablo 9'da verilmiştir. Parametrelerin S/N'e katkıları incelendiğinde penetrasyon deney sonuçlarına en yüksek etkiye sahip parametrelerin sırasıyla kenevir yağı, grafen, sıcaklık ve süre olduğu bulunmuştur.

Tablo 9. RTFOT Öncesi Penetrasyon İçin Performans Tahminleri (En büyük -en iyi)

Parametreler	Seviyeler	S/N üzerine etki
Grafen	A3	0,507
Yağ	B4	1,742
Sıcaklık	C3	0,450
Süre	D1	0,195
Tüm Parametrelerin Katkısı		3,021
Ortalama Performans İstatistiği (S/N)		40,187
Optimum Şartlarda Beklenen Değer (S/N) / (0,1 mm)		43,080 / 142,560
Doğrulama Deneyi Sonucu (S/N) / (0,1 mm)		43,00 / 141,30
Güven Aralığı ($\alpha=95\%$) / (S/N)		42,696 / 43,464

RTFOT öncesi penetrasyon için en büyük-en iyi performans istatistiğine göre optimum seviyeler A3 (Grafen %0,5), B4 (Kenevir yağı %2), C3 (160 °C) ve D1 (10 dk.) olarak bulunmuştur. Taguchi yöntemi ile %95 güven aralığında yapılan tahmine göre optimum S/N değeri 42,696 ile 43,464 arasında olmalıdır. Deney planında optimum seviyelerin bir arada olduğu bir deney bulunmadığı için doğrulama deneyi yapılmıştır. Öncelikle "A3, B4, C3, D1" parametre seviyelerine göre modifiye bitüm hazırlanmış ve ardından penetrasyon deneyi yapılmıştır. Doğrulama deneyi sonucunda 141,30 (0.1 mm) penetrasyon değeri elde edilmiştir ve S/N değeri 43,00 olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan S/N değeri 42,696 ile 43,464 arasında olduğundan sonuç %95 güven aralığında doğrudur.



Şekil 36. RTFOT öncesi penetrasyon deneylerinde performans istatistiği

Şekil 36’da her bir parametre ve seviye için ortalama performans istatistikleri grafik olarak verilmiştir. Grafen katkısı %0,5 oranına kadar kullanıldığında penetrasyon değerini bir miktar artırmış, %1 oranında kullanıldığında ise penetrasyon değerini azaltmıştır. Yağ katkısı eklenmesi penetrasyon değerini yükseltmiştir. Sıcaklığın ve sürenin penetrasyon değerine etkisi az olmakla birlikte süre artışı ve sıcaklığın 2.seviyesi penetrasyon değerini azaltmıştır.

Tablo 10. RTFOT Öncesi Penetrasyon Deneylerine Ait ANOVA Tablosu

Parametreler	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Varyans	F-Değeri	Net Toplam	Katkı	P-Değeri
Grafen	3	4,980	1,660	99,359	4,930	15,66%	0,0017
Yağ	3	22,660	7,553	452,067	22,610	71,26%	0,0002
Sıcaklık	3	3,510	1,170	70,029	3,460	11,04%	0,0028
Süre	3	0,598	0,199	11,930	0,548	1,88%	0,0357
Hata	3	0,050	0,017			0,16%	
Toplam	15	31,799				100	

Deney planına göre yapılmış olan penetrasyon deneylerinin istatistiksel açıdan anlamlılığın belirlenmesi amacıyla ANOVA (varyans analizi) yapılarak Tablo 10’da verilmiştir. Parametrelerin optimizasyon üzerindeki etkilerini F değeri göstermektedir ve bu değer sapmaların karesinin ortalama karesel hataya oranı şeklinde hesap edilmektedir (Roy, 2010). Parametrenin deney üzerindeki etkisi arttıkça F değeri de artmaktadır. F tablosunda F değeri 3,3 için %95 güven seviyesinde 9,277’dir. Tüm parametrelerin P değeri 0,05’ten küçüktür. Parametrelerin F değerlerinin tablodan bulunan 9,277 F değerinden büyük olması tüm parametrelerin varyansının, hatanın varyansına göre anlamlı olduğunu yani istatistiksel olarak geçerli olduğunu göstermektedir. ANOVA tablosuna göre deney sonuçlarına en fazla katkıyı %71,26 oranıyla yağ ve %15,66 oranıyla grafen sağlamaktadır.

RTFOT öncesi penetrasyon için penetrasyon değerinin minimum olması istendiği durumda en küçük-en iyi performans istatistiğine göre hesaplar yapılmaktadır. En küçük-en iyi

performans istatistiğine göre yapılan RTFOT öncesi penetrasyon deneylerinin performans istatistikleri Tablo 11’de verilmiştir. En küçük-en iyi performans istatistiğinde S/N değerleri hesaplandığında, en büyük-en iyi performans istatistiğinde hesaplanan S/N değerleri ile en küçük-en iyi performans istatistiğinde hesaplanan S/N değerleri birbirinin negatifi olarak bulunmaktadır. Bundan dolayı S/N değerleri ve ortalama S/N değerleri ayrıca verilmeyecektir. Örnek olarak en büyük-en iyi performans istatistiğinde grafenin 1.seviyede ortalama S/N etkisi 40,336 iken, en küçük- en iyi performans istatistiğinde -40,336’dır. Ayrıca her iki performans istatistiğinde de aynı deney verileri kullanıldığı için ANOVA tabloları değişmemektedir.

Tablo 11. RTFOT Öncesi Penetrasyon İçin Performans Tahminleri (En küçük -en iyi)

Parametreler	Seviyeler	S/N üzerine etki
Grafen	A4	0,941
Yağ	B1	1,593
Sıcaklık	C2	0,770
Süre	D4	0,202
Tüm Faktörlerin Katkısı (S/N)		3,505
Ortalama Performans İstatistiği (S/N)		-40,187
Optimum Şartlarda Beklenen Değer (S/N) / (0,1 mm)		-36,681 / 68,245
Doğrulama Deneyi Sonucu (S/N) / (0,1 mm)		-36,37 / 65,80
Güven Aralığı ($\alpha=95\%$) (S/N)		-37,041 / -36,322

En küçük-en iyi performans istatistiğine göre penetrasyon değerinin minimum olması için optimum seviyeler A4 (Grafen %1), B1 (Kenevir yağı %0), C2 (140 °C) ve D4 (40 dk.) olarak bulunmuştur. Taguchi yöntemi ile %95 güven aralığında yapılan tahmine göre S/N değeri -37,041 ile -36,322 arasında olmalıdır. Deney planında optimum seviyelerin bir arada olduğu bir deney bulunmadığı için doğrulama deneyi yapılmıştır. Öncelikle “A4, B1, C2, D4” parametre seviyelerine göre modifiye bitüm hazırlanmış ve ardından penetrasyon deneyi yapılmıştır. Doğrulama deneyi sonucunda 65,80 (0.1 mm) penetrasyon değeri elde edilmiştir ve S/N değeri -36,37 olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan S/N değeri -37,041 ile -36,322 arasında olduğundan sonuç %95 güven aralığında doğrudur.

RTFOT Sonrası Penetrasyon Deneyi Sonuçları

Deney planına göre hazırlanan modifiye bitümlerin ince film halinde ısıtma deneyine tabi tutulduktan sonra (RTFOT sonrası) penetrasyon deneyleri yapılmıştır. Optimum deney sonucunun maksimum olması istenilen durum için en büyük-en iyi performans istatistiği seçilerek Taguchi yöntemi ile S/N değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan S/N değerleri ve penetrasyon deney sonuçları Tablo 12’de verilmiştir.

Tablo 12. RTFOT Sonrası Penetrasyon Deney Sonuçları ve S/N Değerleri

Deney No	1. Numune (0.1mm)	2. Numune (0.1mm)	3. Numune (0.1mm)	Ortalama (0.1mm)	S/N
1	52,00	51,70	52,50	52,07	34,33
2	54,50	53,20	54,20	53,97	34,64
3	56,90	58,40	58,40	57,90	35,25
4	71,40	73,00	73,10	72,50	37,21
5	45,40	45,60	46,90	45,97	33,25
6	62,30	61,90	61,80	62,00	35,85
7	67,40	67,10	68,00	67,50	36,59
8	74,10	76,70	76,50	75,77	37,59
9	50,30	50,60	49,30	50,07	33,99
10	56,30	54,80	56,80	55,97	34,96
11	56,80	54,50	55,20	55,50	34,89
12	64,90	66,90	65,60	65,80	36,36
13	44,30	45,20	43,40	44,30	32,93
14	55,20	56,40	55,20	55,60	34,90
15	49,00	48,60	47,80	48,47	33,71
16	57,50	57,80	58,70	58,00	35,27

S/N değerleri hesaplandıktan sonra parametrelerin seviyelere göre ortalama S/N değerleri hesap edilmiştir. Ortalama S/N değerleri Tablo 13'te verilmiştir. Tablo incelendiğinde, grafenin 2.seviyesi (A2), yağın 4.seviyesi (B4), sıcaklığın 3.seviyesi (C3) ve sürenin 1. Seviyesi (D1) en yüksek ortalama S/N etkilerine sahiptir.

Tablo 13. RTFOT sonrası penetrasyon deneylerinde ortalama S/N etkileri

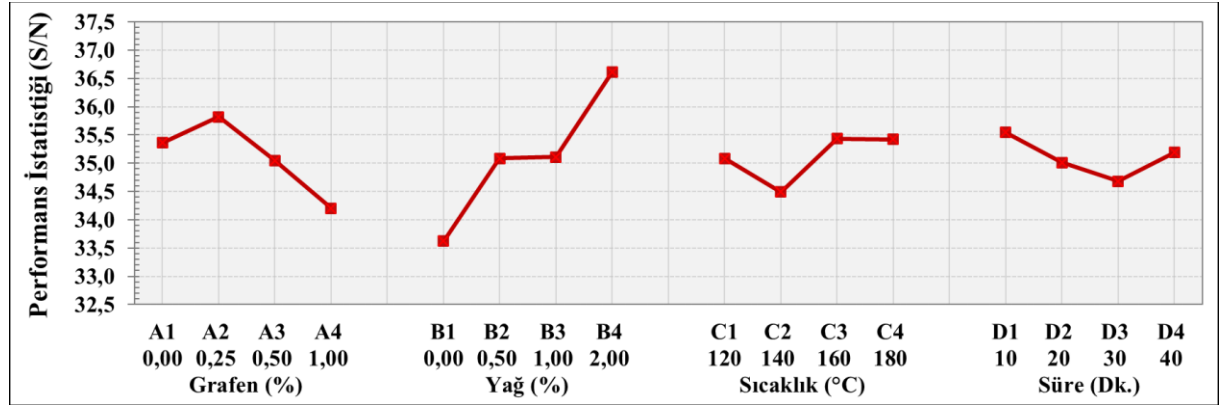
	Ortalama S/N Etkileri			
	Grafen	Yağ	Sıcaklık	Süre
1. Seviye	35,359	33,625	35,083	35,546
2. Seviye	35,818	35,088	34,491	35,012
3. Seviye	35,050	35,109	35,434	34,682
4. Seviye	34,202	36,607	35,420	35,189

Ortalama S/N etkileri belirlendikten sonra her bir parametrenin S/N'e olan katırları bulunarak RTFOT sonrası penetrasyonun performans tahminleri yapılmıştır. Performans tahminleri Tablo 14'de verilmiştir. Parametrelerin S/N'e katkıları incelendiğinde penetrasyon deney sonuçlarına en yüksek etkiye sahip parametrelerin sırasıyla kenevir yağı, grafen, sıcaklık ve süre olduğu bulunmuştur.

Tablo 14. RTFOT Sonrası Penetrasyon İçin Peformans Tahminleri (En büyük -en iyi)

Parametreler	Seviyeler	S/N üzerine etki
Grafen	A2	0,711
Yağ	B4	1,500
Sıcaklık	C3	0,327
Süre	D1	0,439
Tüm Faktörlerin Katkısı (S/N)		2,977
Ortalama Performans İstatistiği (S/N)		35,107
Optimum Şartlarda Beklenen Değer (S/N) / (0,1 mm)		38,084 / 80,204
Doğrulama Deneyi Sonucu (S/N) / (0,1 mm)		38,190 / 81,20
Güven Aralığı ($\alpha=95\%$) (S/N)		37,866 / 38,302

RTFOT sonrası penetrasyon için en büyük-en iyi performans istatistiğine göre optimum seviyeler A2 (Grafen %0,25), B4 (Kenevir yağı %2), C3 (160 °C) ve D1 (10 dk.) olarak bulunmuştur. Taguchi yöntemi ile %95 güven aralığında yapılan tahmine göre optimum S/N değeri 37,866 ile 38,302 arasında olmalıdır. Deney planında optimum seviyelerin bir arada olduğu bir deney bulunmadığı için doğrulama deneyi yapılmıştır. Öncelikle “A2, B4, C3, D1” parametre seviyelerine göre modifiye bitüm hazırlanmış ve önce RTFOT sonra da penetrasyon deneyi yapılmıştır. Doğrulama deneyi sonucunda 81,20 (0.1 mm) penetrasyon değeri elde edilmiştir ve S/N değeri 38,19 olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan S/N değeri 37,866 ile 38,302 arasında olduğundan sonuç %95 güven aralığında doğrudur.

**Şekil 37.** RTFOT sonrası penetrasyon deneylerinde performans istatistiği

Şekil 37’de her bir parametre ve seviye için ortalama performans istatistikleri grafik olarak verilmiştir. Grafen katkısı %0,25 oranına kadar kullanıldığında penetrasyon değerini bir miktar artırmış, %0,5 oranında ve %1 oranında kullanıldığında ise penetrasyon değerini azaltmıştır. Yağ katkısı eklenmesi penetrasyon değerini yükseltmiştir. Sıcaklığın ve sürenin penetrasyon değerine etkisi az olmakla birlikte süre artışı ve sıcaklığın 2.seviyesi penetrasyon değerini azaltmıştır.

Tablo 15. RTFOT Sonrası Penetrasyon Deneylerine Ait ANOVA Tablosu

Parametreler	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Varyans	F-Değeri	Net Toplam	Katkı	P-Değeri
Grafen	3	5,567	1,856	344,293	5,550	20,41%	0,0003
Yağ	3	17,794	5,931	1.100,553	17,778	65,25%	0,0000
Sıcaklık	3	2,338	0,779	144,617	2,322	8,57%	0,0010
Süre	3	1,555	0,518	96,149	1,538	5,70%	0,0018
Hata	3	0,016	0,005			0,06%	
Toplam	15	27,269				100	

Deney planına göre yapılmış olan penetrasyon deneylerinin istatistiksel açıdan anlamlılığın belirlenmesi amacıyla ANOVA (varyans analizi) yapılarak Tablo 15’te verilmiştir. Tüm parametrelerin P değeri 0,05’ten küçüktür. F tablosunda F değeri 3,3 için %95 güven seviyesinde 9,277’dir. Parametrelerin F değerlerinin tablodan bulunan 9,277 F değerinden büyük olması istatistiksel olarak deneylerin geçerli olduğunu göstermektedir. ANOVA tablosuna göre deney sonuçlarına en fazla katkıyı %65,25 oranıyla yağ, ve %20,41 oranıyla grafen sağlamaktadır.

RTFOT sonrası penetrasyon için penetrasyon değerinin minimum olması istendiği durumda en küçük-en iyi performans istatistiğine göre hesaplar yapılmaktadır. En küçük-en iyi performans istatistiğine göre yapılan RTFOT sonrası penetrasyon deneylerinin performans istatistikleri Tablo 16’da verilmiştir.

Tablo 16. RTFOT Sonrası Penetrasyon İçin Performans Tahminleri (En küçük -en iyi)

Parametreler	Seviyeler	S/N üzerine etki
Grafen	A4	0,905
Yağ	B1	1,482
Sıcaklık	C2	0,616
Süre	D3	0,425
Tüm Faktörlerin Katkısı (S/N)		3,428
Ortalama Performans İstatistiği (S/N)		-35,107
Optimum Şartlarda Beklenen Değer (S/N) / (0,1 mm)		-31,679 / 38,366
Doğrulama Deneyi Sonucu (S/N) / (0,1 mm)		-31,76 / 38,72
Güven Aralığı ($\alpha=95\%$) (S/N)		-31,883 / -31,475

En küçük-en iyi performans istatistiğine göre penetrasyon değerinin minimum olması için optimum seviyeler A4 (Grafen %1), B1 (Kenevir yağı %0), C2 (140 °C) ve D3 (30 dk.) olarak bulunmuştur. Taguchi yöntemi ile %95 güven aralığında yapılan tahmine göre S/N değeri -31,883 ile -31,475 arasında olmalıdır. Deney planında optimum seviyelerin bir arada

olduğu bir deney bulunmadığı için doğrulama deneyi yapılmıştır. Öncelikle “A4, B1, C2, D3” parametre seviyelerine göre modifiye bitüm hazırlanmış ve önce RTFOT sonra da penetrasyon deneyi yapılmıştır. Doğrulama deneyi sonucunda 38,72 (0.1 mm) penetrasyon değeri elde edilmiştir ve S/N değeri -31,76 olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan S/N değeri -31,883 ile -31,475 arasında olduğundan sonuç %95 güven aralığında doğrudur. Bu sonuçlar taguchi yöntemi ile yapılan tahminlerin deneysel verilerle uyumlu olduğunu göstermektedir.

RTFOT Öncesi Yumuşama Noktası Deneyi Sonuçları

Deney planına göre hazırlanan modifiye bitümlerin RTFOT öncesi yumuşama noktası deneyleri yapılmıştır. Optimum deney sonucunun minimum olması istenilen durum için en küçük-en iyi performans istatistiği seçilerek Taguchi yöntemi ile S/N değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan S/N değerleri ve penetrasyon deney sonuçları Tablo 17’de verilmiştir.

Tablo 17. RTFOT Öncesi Yumuşama Noktası Deney Sonuçları ve S/N Değerleri

Deney No	1.Numune (°C)	2.Numune (°C)	Ortalama (°C)	S/N
1	46,10	46,50	46,30	-33,31
2	44,90	45,70	45,30	-33,12
3	44,80	45,00	44,90	-33,04
4	43,50	44,70	44,10	-32,89
5	48,70	48,10	48,40	-33,70
6	47,20	47,60	47,40	-33,52
7	46,50	47,30	46,90	-33,42
8	43,70	44,10	43,90	-32,85
9	47,50	48,30	47,90	-33,61
10	47,60	47,40	47,50	-33,53
11	45,90	46,30	46,10	-33,27
12	43,80	44,70	44,25	-32,92
13	47,70	48,80	48,25	-33,67
14	46,10	46,70	46,40	-33,33
15	46,50	46,90	46,70	-33,39
16	45,30	45,20	45,25	-33,11

S/N değerleri hesaplandıktan sonra parametrelerin seviyelere göre ortalama S/N değerleri hesap edilmiştir. Ortalama S/N değerleri Tablo 18’de verilmiştir. Tablo incelendiğinde, grafenin 1.seviyesi (A1), yağın 4.seviyesi (B4), sıcaklığın 3.seviyesi (C3) ve sürenin 2. Seviyesi (D2) en yüksek ortalama S/N etkilerine sahiptir.

Tablo 18. RTFOT Öncesi Yumuşama Noktası Deneylerinde Ortalama S/N Etkileri

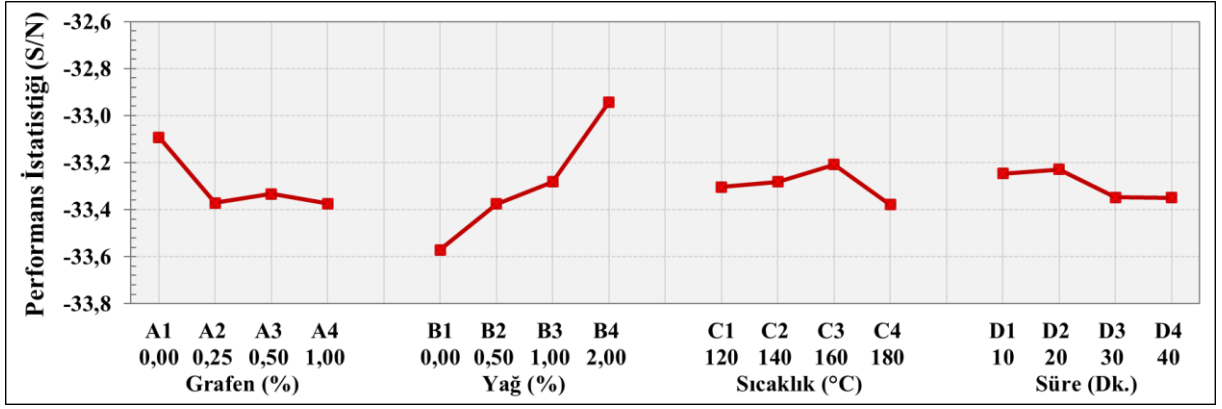
Ortalama S/N Etkileri				
	Grafen	Yağ	Sıcaklık	Süre
1. Seviye	-33,092	-33,571	-33,303	-33,246
2. Seviye	-33,371	-33,375	-33,281	-33,229
3. Seviye	-33,333	-33,282	-33,208	-33,347
4. Seviye	-33,375	-32,942	-33,379	-33,349

Ortalama S/N etkileri belirlendikten sonra her bir parametrenin S/N'e olan katırları bulunarak RTFOT öncesi yumuşama noktasının performans tahminleri yapılmıştır. Performans tahminleri Tablo 19'da verilmiştir. Parametrelerin S/N'e katkıları incelendiğinde yumuşama noktası deney sonuçlarına en yüksek etkiye sahip parametrelerin sırasıyla kenevir yağı, grafen, sıcaklık ve süre olduğu bulunmuştur.

Tablo 19. RTFOT Öncesi Yumuşama Noktası İçin Performans Tahminleri (En küçük -en iyi)

Parametreler	Seviyeler	S/N üzerine etki
Grafen	A1	0,201
Yağ	B4	0,351
Sıcaklık	C3	0,085
Süre	D2	0,064
Tüm Faktörlerin Katkısı (S/N)		0,700
Ortalama Performans İstatistiği (S/N)		-33,293
Optimum Şartlarda Beklenen Değer (S/N) / (°C)		-32,592 / 42,620
Doğrulama Deneyi Sonucu (S/N) / (°C)		-32,540 / 42,35
Güven Aralığı ($\alpha=95\%$) (S/N)		-32,699 / -32,486

RTFOT öncesi yumuşama noktası için en küçük-en iyi performans istatistiğine göre optimum seviyeler A1 (Grafen %0), B4 (Kenevir yağı %2), C3 (160 °C) ve D2 (20 dk.) olarak bulunmuştur. Taguchi yöntemi ile %95 güven aralığında yapılan tahmine göre optimum S/N değeri -32,699 ile -32,486 arasında olmalıdır. Deney planında optimum seviyelerin bir arada olduğu bir deney bulunmadığı için doğrulama deneyi yapılmıştır. Öncelikle "A1, B4, C3, D2" parametre seviyelerine göre modifiye bitüm hazırlanmış ve ardından yumuşama noktası deneyi yapılmıştır. Doğrulama deneyi sonucunda 42,35°C yumuşama noktası değeri elde edilmiştir ve S/N değeri -32,54 olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan S/N değeri -32,699 ile -32,486 arasında olduğundan sonuç %95 güven aralığında doğrudur.



Şekil 38. RTFOT Öncesi Yumuşama Noktası Deneylerinde Performans İstatistiği

Şekil 38’de her bir parametre ve seviye için ortalama performans istatistikleri grafik olarak verilmiştir. Grafen katkısının kullanılması yumuşama noktası değerini artırmıştır. Yağ katkısı eklenmesi yumuşama noktası değerini azaltmıştır. Sıcaklık 3.seviyeye kadar yumuşama noktasını azaltırken 4.seviyede bir miktar artırmıştır. Süre 1. ve 2. seviyede hemen hemen aynı etkiyi gösterirken 3. ve 4. seviyelerde yumuşama noktasını artırmıştır.

Tablo 20. RTFOT Öncesi Yumuşama Noktası Deneylerine Ait ANOVA Tablosu

Parametreler	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Varyans	F-Değeri	Net Toplam	Katkı	P-Değeri
Grafen	3	0,220	0,073	49,685	0,215	18,88%	0,0047
Yağ	3	0,830	0,277	187,714	0,825	71,34%	0,0007
Sıcaklık	3	0,060	0,020	13,491	0,055	5,13%	0,0301
Süre	3	0,050	0,017	11,248	0,045	4,27%	0,0386
Hata	3	0,004	0,001			0,380%	
Toplam	15	1,163				100	

Deney planına göre yapılmış olan yumuşama noktası deneylerinin istatistiksel açıdan anlamlılığın belirlenmesi amacıyla ANOVA (varyans analizi) yapılarak Tablo 20’de verilmiştir. Tüm parametrelerin P değeri 0,05’ten küçüktür ve F değerlerinin tablodan bulunan 9,277 F değerinden büyük olması istatistiksel olarak deneylerin geçerli olduğunu göstermektedir. ANOVA tablosuna göre deney sonuçlarına en fazla katkıyı %71,34 oranıyla yağ, ve %18,88 oranıyla grafen sağlamaktadır. Sıcaklık %5,13 süre ise %4,27 katkıya sahiptir.

RTFOT öncesi yumuşama noktası deneyi için yumuşama noktası değerinin maksimum olması istendiği durumda en büyük-en iyi performans istatistiğine göre hesaplar yapılmaktadır. En büyük-en iyi performans istatistiğine göre yapılan RTFOT öncesi yumuşama deneylerinin performans istatistikleri Tablo 21’de verilmiştir.

Tablo 21. RTFOT Öncesi Yumuşama Noktası İçin Performans Tahminleri (En büyük -en iyi)

Parametreler	Seviyeler	S/N üzerine etki
Grafen	A4	0,082
Yağ	B1	0,279
Sıcaklık	C4	0,086
Süre	D4	0,057
Tüm Faktörlerin Katkısı (S/N)		0,503
Ortalama Performans İstatistiği (S/N)		33,293
Optimum Şartlarda Beklenen Değer (S/N) / (°C)		33,796 / 48,956
Doğrulama Deneyi Sonucu (S/N) / (°C)		33,82 / 49,10
Güven Aralığı ($\alpha=95\%$) (S/N)		33,689 / 33,903

En büyük-en iyi performans istatistiğine göre yumuşama noktasının maksimum olması için optimum seviyeler A4 (Grafen %1), B1 (Kenevir yağı %0), C4 (180 °C) ve D4 (40 dk.) olarak bulunmuştur. Taguchi yöntemi ile %95 güven aralığında yapılan tahmine göre S/N değeri 33,689 ile 33,903 arasında olmalıdır. Deney planında optimum seviyelerin bir arada olduğu bir deney bulunmadığı için doğrulama deneyi yapılmıştır. Öncelikle “A4, B1, C4, D4” parametre seviyelerine göre modifiye bitüm hazırlanmış ve yumuşama noktası deneyi yapılmıştır. Doğrulama deneyi sonucunda 49,10°C yumuşama noktası değeri elde edilmiştir ve S/N değeri 33,82 olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan S/N değeri 33,689 ile 33,903 arasında olduğundan sonuç %95 güven aralığında doğrudur. Bu sonuçlar taguchi yöntemi ile yapılan tahminlerin deneysel verilerle uyumlu olduğunu göstermektedir.

RTFOT Sonrası Yumuşama Noktası Deneyi Sonuçları

Deney planına göre hazırlanan modifiye bitüm karışımlarının RTFOT sonrası yumuşama noktası deneyleri yapılmıştır. Optimum deney sonucunun minimum olması istenilen durum için en küçük-en iyi performans istatistiği seçilerek Taguchi yöntemi ile S/N değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan S/N değerleri ve penetrasyon deney sonuçları Tablo 22’de verilmiştir.

Tablo 22. RTFOT Sonrası Yumuşama Noktası Deney Sonuçları ve S/N Değerleri

Deney No	1.Numune (°C)	2.Numune (°C)	Ortalama (°C)	S/N
1	53,10	52,90	53,00	-34,49
2	52,40	52,60	52,50	-34,40
3	52,00	52,10	52,05	-34,33
4	52,20	52,30	52,25	-34,36
5	54,90	55,10	55,00	-34,81

Tablo 22. (devamı)

6	54,80	54,60	54,70	-34,76
7	53,70	53,80	53,75	-34,61
8	51,90	51,80	51,85	-34,29
9	55,80	55,40	55,60	-34,90
10	54,90	55,10	55,00	-34,81
11	53,40	53,20	53,30	-34,53
12	52,10	52,30	52,20	-34,35
13	55,50	55,70	55,60	-34,90
14	53,00	53,20	53,10	-34,50
15	53,70	53,90	53,80	-34,62
16	51,60	51,80	51,70	-34,27

S/N değerleri hesaplandıktan sonra parametrelerin seviyelere göre ortalama S/N değerleri hesap edilmiştir. Ortalama S/N değerleri Tablo 23'te verilmiştir. Tablo incelendiğinde, grafenin 1.seviyesi (A1), yağın 4.seviyesi (B4), sıcaklığın 3.seviyesi (C3) ve sürenin 2. Seviyesi (D1) en yüksek ortalama S/N etkilerine sahiptir.

Tablo 23. RTFOT Sonrası Yumuşama Noktası Deneylerinde Ortalama S/N Etkileri

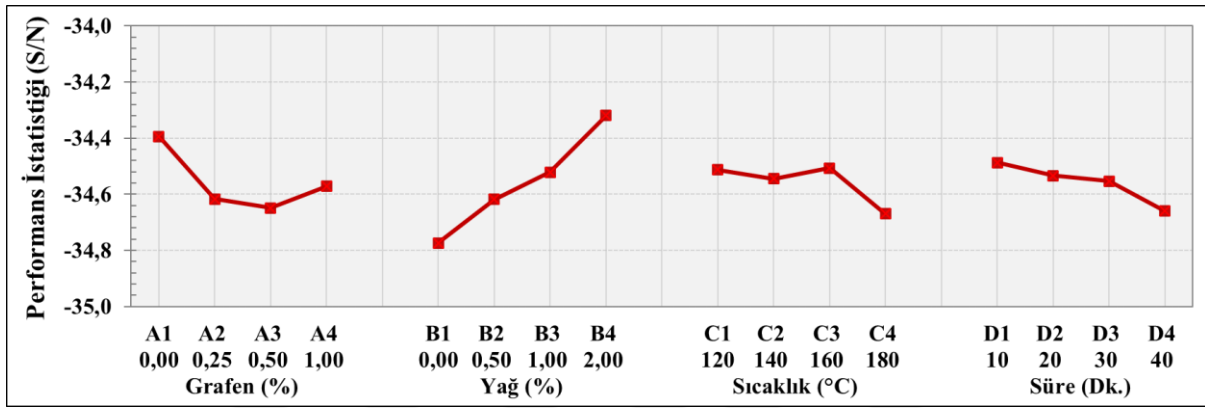
	Ortalama S/N Etkileri			
	Grafen	Yağ	Sıcaklık	Süre
1. Seviye	-34,395	-34,774	-34,512	-34,487
2. Seviye	-34,617	-34,618	-34,545	-34,534
3. Seviye	-34,649	-34,522	-34,507	-34,553
4. Seviye	-34,572	-34,320	-34,670	-34,660

Ortalama S/N etkileri belirlendikten sonra her bir parametrenin S/N'e olan katıları bulunarak RTFOT sonrası yumuşama noktasının performans tahminleri yapılmıştır. Performans tahminleri Tablo 24'te verilmiştir. Parametrelerin S/N'e katkıları incelendiğinde yumuşama noktası deney sonuçlarına en yüksek etkiye sahip parametrelerin sırasıyla kenevir yağı, grafen, süre ve sıcaklık olduğu bulunmuştur.

Tablo 24. RTFOT Sonrası Yumuşama Noktası İçin Performans Tahminleri (En küçük -en iyi)

Parametreler	Seviyeler	S/N üzerine etki
Grafen	A1	0,164
Yağ	B4	0,238
Sıcaklık	C3	0,052
Süre	D1	0,071
Tüm Faktörlerin Katkısı (S/N)		0,525
Ortalama Performans İstatistiği (S/N)		-34,558
Optimum Şartlarda Beklenen Değer (S/N) / (°C)		-34,033 / 50,312
Doğrulama Deneyi Sonucu (S/N) / (°C)		-34,09 / 50,65
Güven Aralığı ($\alpha=95\%$) (S/N)		-34,136 / -33,931

RTFOT sonrası yumuşama noktası için en küçük-en iyi performans istatistiğine göre optimum seviyeler A1 (Grafen %0), B4 (Kenevir yağı %2), C3 (160 °C) ve D1 (10 dk.) olarak bulunmuştur. Taguchi yöntemi ile %95 güven aralığında yapılan tahmine göre optimum S/N değeri -34,136 ile -33,931 arasında olmalıdır. Deney planında optimum seviyelerin bir arada olduğu bir deney bulunmadığı için doğrulama deneyi yapılmıştır. Öncelikle “A1, B4, C3, D1” parametre seviyelerine göre modifiye bitüm hazırlanmış ve önce RTFOT sonra da yumuşama noktası deneyi yapılmıştır. Doğrulama deneyi sonucunda 50,65°C yumuşama noktası değeri elde edilmiştir ve S/N değeri -34,033 olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan S/N değeri -34,136 ile -33,931 486 arasında olduğundan sonuç %95 güven aralığında doğrudur.



Şekil 39. RTFOT sonrası yumuşama noktası deneylerinde performans istatistiği

Şekil 39’da her bir parametre ve seviye için ortalama performans istatistikleri grafik olarak verilmiştir. Grafen katkısının kullanılması yumuşama noktası değerini artırmıştır en büyük artış %0,5 oranında kullanılması ile yaşanmıştır. Yağ katkısı eklenmesi yumuşama noktası değerini sürekli azaltmıştır. Sıcaklık 3.seviyeye kadar yumuşama noktasına hemen hemen etki etmezken 4.seviyede artırmıştır. Sürenin artışı yumuşama noktasını artırmıştır.

Tablo 25. RTFOT Sonrası Yumuşama Noktası Deneylerine Ait Anova Tablosu

Parametreler	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Varyans	F-Değeri	Net Toplam	Katkı	P-Değeri
Grafen	3	0,155	0,052	37,885	0,151	21,36%	0,0069
Yağ	3	0,433	0,144	105,923	0,429	59,71%	0,0015
Sıcaklık	3	0,069	0,023	16,951	0,065	9,56%	0,0219
Süre	3	0,064	0,021	15,643	0,060	8,82%	0,0245
Hata	3	0,004	0,001			0,56%	
Toplam	15	0,725				100	

Yumuşama noktası deneylerinin istatistiksel açıdan anlamlılığın belirlenmesi amacıyla ANOVA yapılarak Tablo 25’te verilmiştir. Tüm parametrelerin P değeri 0,05’ten küçüktür ve F değerleri 9,277’den büyük olması istatistiksel olarak deneylerin geçerli olduğunu

göstermektedir. ANOVA tablosuna göre deney sonuçlarına en fazla katkıyı %59,71 oranıyla yağ ve %21,36 oranıyla grafen sağlamaktadır. Sıcaklık %9,56 süre ise %8,82 katkıya sahiptir.

RTFOT sonrası yumuşama noktası deneyi için yumuşama noktası değerinin minimum olması istendiği durumda en büyük-en iyi performans istatistiğine göre hesaplar yapılmaktadır. En büyük-en iyi performans istatistiğine göre yapılan RTFOT sonrası yumuşama deneylerinin performans istatistikleri Tablo 26’da verilmiştir.

Tablo 26. RTFOT Sonrası Yumuşama İçin Performans Tahminleri (En büyük -en iyi)

Parametreler	Seviyeler	S/N üzerine etki
Grafen	A3	0,091
Yağ	B1	0,216
Sıcaklık	C4	0,111
Süre	D4	0,101
Tüm Faktörlerin Katkısı (S/N)		0,519
Ortalama Performans İstatistiği (S/N)		34,558
Optimum Şartlarda Beklenen Değer (S/N) / (°C)		35,077 / 56,736
Doğrulama Deneyi Sonucu (S/N) / (°C)		35,00 / 56,20
Güven Aralığı ($\alpha=95\%$) (S/N)		34,957 / 35,180

RTFOT sonrası yumuşama noktasının maksimum olması için optimum seviyeler A3 (Grafen %0,50), B1 (Kenevir yağı %0), C4 (180 °C) ve D4 (40 dk.) olarak bulunmuştur. Taguchi yöntemi ile %95 güven aralığında yapılan tahmine göre S/N değeri 34,957 ile 35,180 arasında olmalıdır. Deney planında optimum seviyelerin bir arada olduğu bir deney bulunmadığı için doğrulama deneyi yapılmıştır. Öncelikle “A3, B1, C4, D4” parametre seviyelerine göre modifiye bitüm hazırlanmış ve ardından önce RTFOT sonra da yumuşama noktası deneyi yapılmıştır. Doğrulama deneyi sonucunda 56,20 °C yumuşama noktası değeri elde edilmiştir ve S/N değeri 35,00 olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan S/N değeri 34,957 ile 35,180 arasında olduğundan sonuç %95 güven aralığında doğrudur.

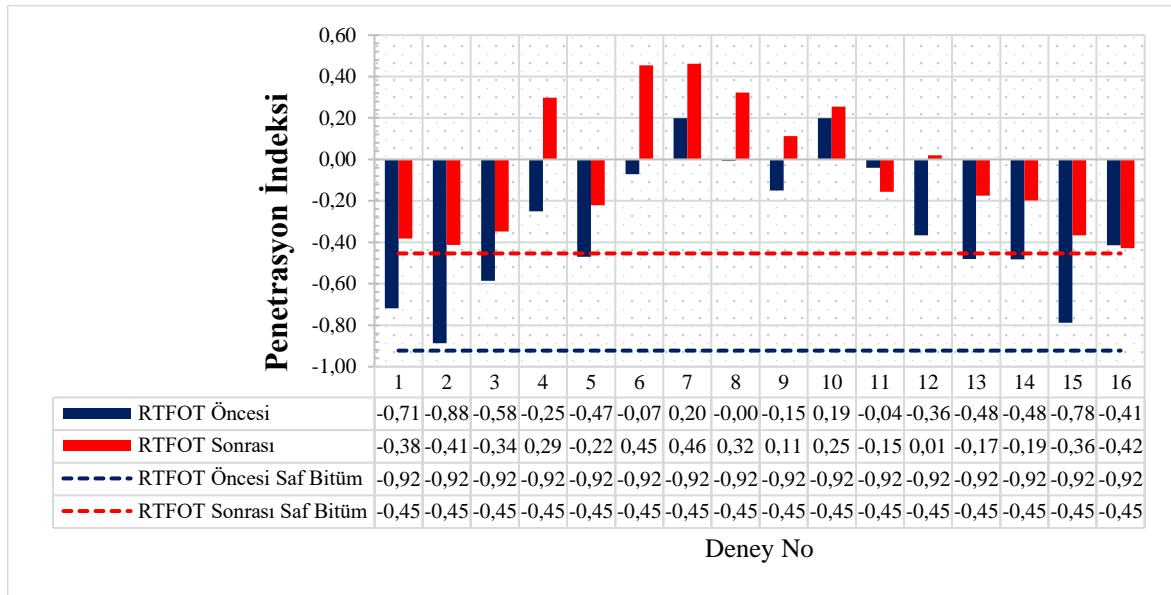
Penetrasyon İndeksi

Penetrasyon ve yumuşama noktası deney sonuçları kullanılarak her bir deney planı için ayrı ayrı penetrasyon indeksleri hesaplanmıştır. Hesaplanan penetrasyon indeksi değerleri Tablo 27’de verilmiştir.

Tablo 27. Penetrasyon İndeksi Tablosu

Deney No	Saf Bitüm	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
RTFOT Öncesi	-0,92	-0,72	-0,89	-0,59	-0,25	-0,47	-0,07	0,20	-0,01	-0,15	0,20	-0,04	-0,37	-0,48	-0,48	-0,79	-0,41
RTFOT Sonrası	-0,45	-0,38	-0,41	-0,35	0,30	-0,22	0,45	0,46	0,32	0,11	0,26	-0,16	0,02	-0,17	-0,20	-0,37	-0,43

PI değişimlerinin daha belirgin incelenmesi için Şekil 40'ta PI grafiği verilmiştir.

**Şekil 40.** Penetrasyon indeks grafiği

PI grafiği incelendiğinde saf bitüme göre modifiye edilmiş bitümlerin tamamının penetrasyon indekslerinde artış meydana gelmiştir. Özellikle grafen katkısının %0,25 ve %0,5 olduğu karışımlarda penetrasyon indeksi hem RTFOT öncesinde hem sonrasında daha fazla artış göstermiştir. Grafen katkısı bulunmayan 1,2 ve 3 numaralı penetrasyon indeksi değerlerinde artışın nispeten daha az olduğu görülmektedir. Grafen oranı %0 ve Yağ oranı %2 olan 4 numaralı penetrasyon indeksindeki artış ise yağın varlığından kaynaklanmaktadır. RTFOT öncesi ve sonrası en büyük artış 7 numaralı ve 10 numaralı penetrasyon indekslerinde olduğu görülmektedir. Deney planı incelendiğinde 7 numaralı deneyde grafen %0,25, yağ %1, sıcaklık 180°C, süre 10dk., 10 numaralı deneyde ise %0,5 grafen %0,5 yağ, sıcaklık 180°C, süre ise 30 dakikadır. Sürenin penetrasyon indeksine etkisi çok düşük olmakla birlikte sıcaklığın etkisi süreye kıyasla daha fazladır ve sıcaklık seviyeleri arasında en çok artışa sebep olan seviye sıcaklığın 180°C olduğu 4.seviyedir.

Parlama Noktası Deney Sonuçları

Bitümlü karışımların karıştırılması, taşınma ve uygulanma işlemlerinin güvenli bir şekilde yapılabilmesi için bu sıcaklıklarda bitümün alev almaması parlamaması gerekmektedir.

Karayolu Teknik Şartnamesine göre parlama noktası değeri minimum 230°C olmalıdır. Saf bitüme ait parlama noktası 300°C olarak bulunmuştur. Parlama noktası deneyi grafen nanoplateletin, kenevir tohumu yağının, sıcaklığın ve sürenin 1. ve 2. seviyelerine yapılmıştır. Minimum ve maksimum seviyelerin hepsinde parlama noktası değeri 300°C üzerinde bulunmuştur.

Tablo 28. Parlama Noktası Deney Sonuçları

Deney No	Grafen Nanoplatelet	Kenevir Tohumu Yağı	Sıcaklık	Süre	Parlama Noktası
2	%0	%0,5	140°C	20 Dakika	320°C
3	%0	%1	160°C	30 Dakika	301°C
4	%0	%2	180°C	40 Dakika	318°C
12	%0,5	%2	140°C	10 Dakika	306°C
14	%1	%0,5	160°C	10 Dakika	304°C
15	%1	%1	140°C	40 Dakika	308°C

RTFOT Kütle Kaybı Sonuçları

Deney planına göre hazırlanan modifiye bitüm karışımlarının RTFOT deneyleri yapılarak kütle kayıpları hesap edilmiştir. Optimum deney sonucunun minimum olması istenilen durum için en küçük-en iyi performans istatistiği seçilerek Taguchi yöntemi ile S/N değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan S/N değerleri ve RTFOT kütle kaybı sonuçları Tablo 29'da verilmiştir.

Tablo 29. RTFOT Kütle Kaybı Deney Sonuçları ve S/N Değerleri

Deney No	M1 (gr)	M2 (gr)	Kütle Kaybı(%)	S/N
1	147,40	147,38	-0,0558	-34,93
2	147,90	147,88	-0,0565	-35,04
3	147,60	147,58	-0,0561	-34,98
4	147,80	147,78	-0,0575	-35,19
5	148,10	148,09	-0,0287	-29,15
6	148,20	148,19	-0,0289	-29,21
7	147,80	147,79	-0,0287	-29,15
8	147,80	147,79	-0,0290	-29,24
9	147,69	147,68	-0,0270	-28,63
10	148,19	148,18	-0,0384	-31,69
11	147,90	147,89	-0,0348	-30,83
12	147,94	147,93	-0,0399	-32,02
13	148,08	148,07	-0,0340	-30,63
14	148,14	148,13	-0,0396	-31,94
15	148,36	148,35	-0,0351	-30,91
16	148,19	148,17	-0,0469	-33,42

Kütle kayıplarının S/N değerleri hesaplandıktan sonra parametrelerin seviyelere göre ortalama S/N değerleri hesap edilmiştir. Ortalama S/N değerleri Tablo 30’da verilmiştir. Tablo incelendiğinde, grafenin 2.seviyesi (A2), yağın 1.seviyesi (B1), sıcaklığın 3.seviyesi (C3) ve sürenin 4. seviyesi (D4) en yüksek ortalama S/N etkilerine sahiptir.

Tablo 30. RTFOT Kütle Kaybı Deneylerinde Ortalama S/N Etkileri

Ortalama S/N Etkileri				
	Grafen	Yağ	Sıcaklık	Süre
1. Seviye	-35,034	-30,837	-32,097	-32,012
2. Seviye	-29,190	-31,970	-31,779	-31,435
3. Seviye	-30,792	-31,467	-31,200	-32,309
4. Seviye	-31,725	-32,467	-31,665	-30,986

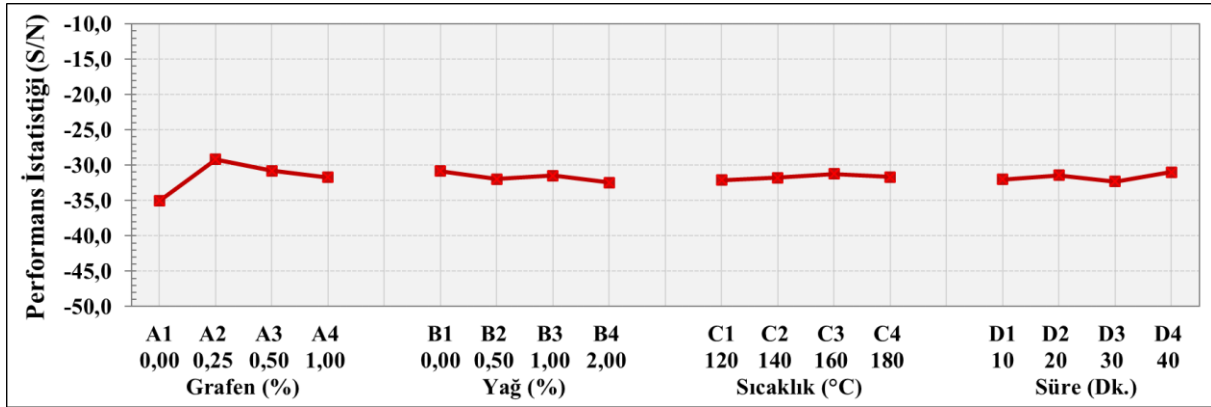
Ortalama S/N etkileri belirlendikten sonra her bir parametrenin S/N’ e olan katkıları bulunarak RTFOT kütle kaybı performans tahminleri yapılmıştır. Performans tahminleri Tablo 31’de verilmiştir. Parametrelerin S/N’ e katkıları incelendiğinde RTFOT kütle kaybı deney sonuçlarına en yüksek etkiye sahip parametrenin grafen olduğu bulunmuştur. Diğer parametrelerin etkisi az olmakla birlikte grafenden sonra en çok etkiye sahip olanlar sırasıyla kenevir yağı, süre ve sıcaklık olduğu bulunmuştur.

Tablo 31. RTFOT Kütle Kaybı İçin Performans Tahminleri

Parametreler	Seviyeler	S/N üzerine etki
Grafen	A2	2,495
Yağ	B1	0,849
Sıcaklık	C3	0,485
Süre	D4	0,699
Tüm Faktörlerin Katkısı (S/N)		4,528
Ortalama Performans İstatistiği (S/N)		-31,685
Optimum Şartlarda Beklenen Değer (S/N) / (‰‰)		-27,157 / 22,795
Doğrulama Deneyi Sonucu (S/N) / (‰‰)		-27,48 / 23,65
Güven Aralığı ($\alpha=95\%$) (S/N)		-27,661 / -26,652

RTFOT kütle kaybı için en küçük-en iyi performans istatistiğine göre optimum seviyeler A2 (Grafen %0,25), B1 (Kenevir yağı %0), C3 (160 °C) ve D4 (40 dk.) olarak bulunmuştur. Taguchi yöntemi ile %95 güven aralığında yapılan tahmine göre S/N değeri -27,661 ile -26,652 arasında olmalıdır. Deney planında optimum seviyelerin bir arada olduğu bir deney bulunmadığı için doğrulama deneyi yapılmıştır. Öncelikle “A2, B1, C3, D4” parametre seviyelerine göre modifiye bitüm hazırlanmış ve ardından kütle kaybı deneyi yapılmıştır.

Doğrulama deneyi sonucunda 23,65 ‰ kütle kaybı değeri elde edilmiştir ve S/N değeri -27,48 olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan S/N değeri -27,661 ile -26,652 arasında olduğundan sonuç %95 güven aralığında doğrudur.



Şekil 41. RTFOT kütle kaybı deneylerinde performans istatistikleri

Kütle kaybı ortalama performans istatistikleri grafik olarak Şekil 41’de verilmiştir. Grafen katkısının kullanılması kütle kaybı değerini azaltmıştır ve en çok azalış %0,25 katkı oranında olmuştur. Yağ katkısı eklenmesi kütle kaybını sürekli artırmıştır. Sıcaklık her seviyede kütle kaybını azaltmıştır. Sürenin artışı genel olarak küçük bir miktar kütle kaybını artırmış ve sadece 3.seviyede bir miktar azaltmıştır.

Tablo 32. RTFOT Kütle Kaybı Deneylerine Ait ANOVA Tablosu

Parametreler	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Varyans	F-Değeri	Net Toplam	Katkı	P-Değeri
Grafen	3	72,975	24,325	737,328	72,876	86,09%	0,0001
Yağ	3	5,842	1,947	59,026	5,743	6,89%	0,0036
Sıcaklık	3	1,657	0,552	16,743	1,558	1,96%	0,0223
Süre	3	4,189	1,396	42,323	4,090	4,94%	0,0059
Hata	3	0,099	0,033			0,12%	
Toplam	15	84,761				100	

RTFOT kütle kaybı deneylerinin istatistiksel açıdan anlamlılığın belirlenmesi amacıyla ANOVA analizi yapılarak Tablo 32’de verilmiştir. Tüm parametrelerin P değerleri 0,05’ten küçük ve F değerleri 9,277’den büyük olması istatistiksel olarak deneylerin geçerli olduğunu göstermektedir. ANOVA tablosuna göre deney sonuçlarına en fazla katkıyı %86,09 oranıyla grafen ve %21,36 oranıyla yağ sağlamaktadır. Süre %4,94 ve sıcaklık %1,96 katkıya sahiptir.

Elastik Geri Dönme Deneyi Sonuçları

Deney planına göre hazırlanan modifiye bitümlerin elastik geri dönme deneyleri yapılmıştır. Optimum deney sonucunun maksimum olması istenilen durum için en büyük-en

iyi performans istatistiği seçilerek Taguchi yöntemi ile S/N değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan S/N değerleri ve elastik geri dönme deney sonuçları Tablo 33'te verilmiştir.

Tablo 33. Elastik Geri Dönme Deney Sonuçları ve S/N Değerleri

Deney No	İlk uzunluk (mm)	d (mm)	R _E (%)	S/N
1	200	14	7,00	16,90
2	200	16	8,00	18,06
3	200	11	5,50	14,81
4	200	10	5,00	13,98
5	200	17	8,50	18,59
6	200	25	12,50	21,94
7	200	16	8,00	18,06
8	200	11	5,50	14,81
9	200	19	9,50	19,55
10	200	22	11,00	20,83
11	200	20	10,00	20,00
12	200	10	5,00	13,98
13	200	24	12,00	21,58
14	200	21	10,50	20,42
15	200	23	11,50	21,21
16	200	13	6,50	16,26

S/N değerleri hesaplandıktan sonra parametrelerin seviyelere göre ortalama S/N değerleri hesap edilerek Tablo 34'te verilmiştir. Tablo verilenlere göre grafenin 4.seviyesi (A4), yağın 2.seviyesi (B2), sıcaklığın 1.seviyesi (C1) ve sürenin 4. Seviyesi (D4) en yüksek ortalama S/N etkilerine sahiptir.

Tablo 34. Elastik Geri Dönme Deneylerinde Ortalama S/N Etkileri

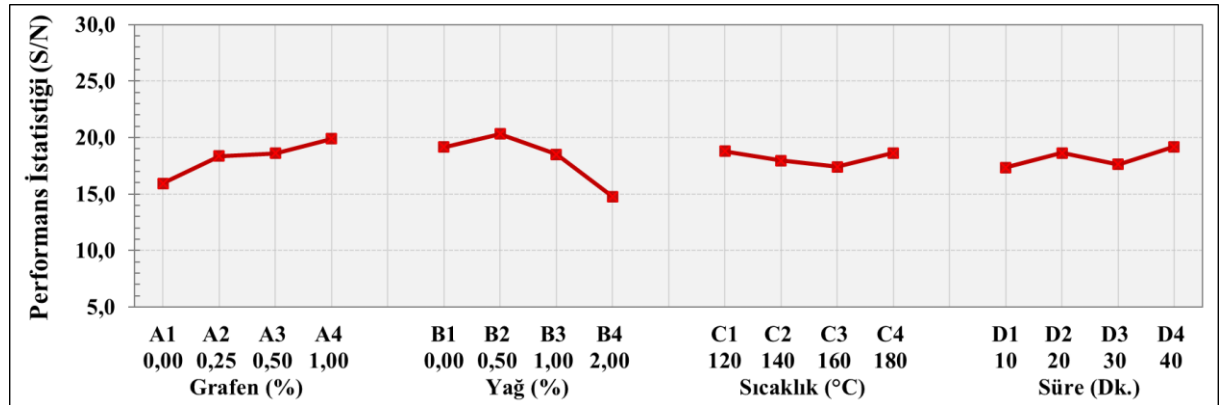
	Ortalama S/N Etkileri			
	Grafen	Yağ	Sıcaklık	Süre
1. Seviye	15,938	19,157	18,775	17,342
2. Seviye	18,349	20,313	17,961	18,613
3. Seviye	18,590	18,521	17,398	17,620
4. Seviye	19,870	14,756	18,613	19,172

Ortalama S/N etkileri belirlendikten sonra elastik geri dönme deneyinin performans tahminleri yapılmıştır. Performans tahminleri Tablo 35'te verilmiştir. Parametrelerin S/N'e katkıları incelendiğinde elastik geri dönme deney sonuçlarına en yüksek etkiye sahip parametrelerin sırasıyla kenevir yağı, grafen, süre ve sıcaklık olduğu bulunmuştur.

Tablo 35. Elastik Geri Dönme Deneyi İçin Performans Tahminleri

Parametreler	Seviyeler	S/N üzerine etki
Grafen	A4	1,683
Yağ	B2	2,126
Sıcaklık	C1	0,588
Süre	D4	0,985
Tüm Faktörlerin Katkısı (S/N)		5,382
Ortalama Performans İstatistiği (S/N)		18,187
Optimum Şartlarda Beklenen Değer (S/N) / (R_E (%))		23,569 / 15,081
Doğrulama Deneyi Sonucu (S/N) / (R_E (%))		22,610 / 13,50
Güven Aralığı ($\alpha=95%$) (S/N)		22,458 / 24,679

Elastik geri dönme deneyi için en büyük-en iyi performans istatistiğine göre optimum seviyeler A4 (Grafen %1), B2 (Kenevir yağı %0,5), C1 (120 °C) ve D4 (40 dk.) olarak bulunmuştur. Taguchi yöntemi ile %95 güven aralığında yapılan tahmine göre S/N değeri 22,458 ile 24,679 arasında olmalıdır. Deney planında optimum seviyelerin bir arada olduğu bir deney bulunmadığı için doğrulama deneyi yapılmıştır. Öncelikle “A4, B2, C1, D4” parametre seviyelerine göre modifiye bitüm hazırlanmış ve ardından elastik geri dönme deneyi yapılmıştır. Doğrulama deneyi sonucunda 13,50 % elastik geri dönme değeri elde edilmiştir ve S/N değeri 22,610 olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan S/N değeri 22,458 ile 24,679 arasında olduğundan sonuç %95 güven aralığında doğrudur.

**Şekil 42.** Elastik geri dönme deneylerinde performans istatistikleri

Şekil 42’de elastik geri dönme deneyi ortalama performans istatistikleri grafik olarak verilmiştir. Grafen katkısının kullanılması elastik geri dönme değerini artırmıştır en büyük artış %1 oranında kullanılması ile yaşanmıştır. Yağ katkısı eklenmesi elastik geri dönme değerini %0,5 oranında küçük bir miktar artırmış, %1 ve %2 oranında ise azaltmıştır. Sıcaklık ve sürenin S/N’ e katkısı çok düşüktür. Sıcaklık artışı 1. seviyeye göre elastik geri dönme değerini

azaltmıştır. Sürenin artışı 1. seviyeye göre kıyaslandığında elastik geri dönme değerini artırmıştır.

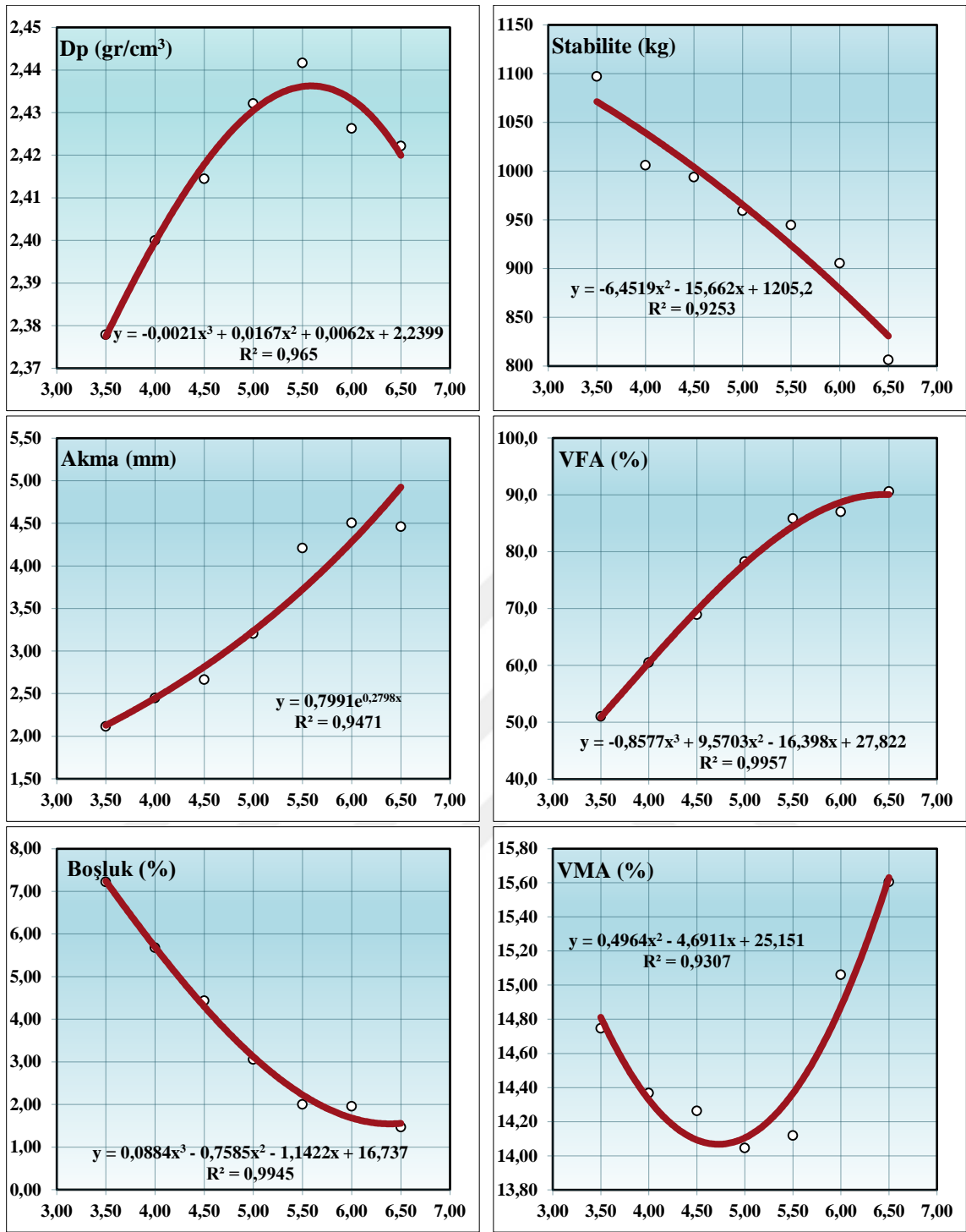
Tablo 36. Elastik Geri Dönme Deneylerine Ait Anova Tablosu

Parametreler	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Varyans	F-Değeri	Net Toplam	Katkı	P-Değeri
Grafen	3	32,324	10,775	67,434	31,844	27,93%	0,0030
Yağ	3	69,373	23,124	144,726	68,893	59,95%	0,0010
Sıcaklık	3	4,801	1,600	10,016	4,322	4,15%	0,0451
Süre	3	8,745	2,915	18,245	8,266	7,56%	0,0198
Hata	3	0,479	0,160			0,41%	
Toplam	15	115,722				100	

Elastik geri dönme deneylerinin istatistiksel açıdan anlamlılığın belirlenmesi amacıyla ANOVA analizi yapılarak Tablo 36’da verilmiştir. Tüm parametrelerin P değerlerinin 0,05’ten küçük ve F değerlerinin 9,277’den büyük olması istatistiksel olarak deneylerin geçerli olduğunu göstermektedir. ANOVA tablosuna göre deney sonuçlarına en fazla katkıyı %59,95 oranıyla yağ, ve %27,93 oranıyla grafen sağlamaktadır. Süre ise %7,56 sıcaklık %4,15 oranında katkıya sahiptir.

Marshall Stabilite Deneyi Sonuçları

Çalışmada öncelikle kullanılacak olan optimum bitüm miktarını belirlemek için daha önce belirtilen gradasyona göre hazırlanmış 1150 gram agrega ve agrega ağırlığının %3,5, %4, %4,5, %5, %5,5, %6 ve %6,5 oranlarında bitüm kullanılarak Marshall stabilite deneyleri yapılmıştır. Her oran için üç numune hazırlanmış ve bu 21 numunenin boşluk oranları, D_p, VMA, VFA, akma ve stabilite değerleri bulunmuştur. Yapılan deneylere ait hesaplar ve sonuçlar Tablo 37’de verilmiştir. Boşluk oranları, D_p, VMA, VFA, akma ve stabilite grafikleri ise Şekil 43’te verilmiştir. Boşluk oranı %4 olacak ve D_p, VMA, VFA, akma ve stabilite değerleri karayolu teknik şartnamesinde belirtilen aralıklarda kalacak şekilde yapılan hesaplamalardan sonra bitüm oranı %4.61 olarak belirlenmiştir. Optimum bitüm oranı ile yapılan Marshall stabilite ve akma deneyinde stabilite 974 kg-kuvvet, akma 2,77 mm, boşluk oranı 4,16, VMA 14,24, VFA 70,8 olarak bulunmuştur.



Şekil 43. Marshall grafikleri

Optimum bitüm yüzdesi belirlendikten sonra deney planına göre hazırlan 16 karışım ile üçer adet marshall numunesi hazırlanarak toplam 48 marshall stabilite deneyi yapılmıştır. Marshall stabilite deney hesapları ve sonuçları Tablo 38’de verilmiştir.

Tablo 38.Optimum Bitüm Yüzdesi İle Marshall Stabilite 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 ³)	V _h (%)	VMA (%)	VFA (%)	Akma (mm)	Stabilite (kg)	Düz. Fak.	Düz. Stabilite (kg)	M/Q (kg/mm)
1A	63,50	63,30	63,40	63,40	1.189,4	699,1	1.191,6	492,5	2,415					3,90	953	1,00	954	
1B	63,30	63,40	63,30	63,33	1.193,7	701,8	1.195,7	493,9	2,417					3,83	943	1,00	946	
1C	63,40	63,30	63,50	63,40	1.187,7	697,4	1.190,4	493,0	2,409					3,92	949	1,00	950	
									2,414	2,52	4,31	14,38	70,00	3,88			950	245
2A	62,70	62,80	62,50	62,67	1.189,4	695,2	1.192,5	497,3	2,392					3,62	927	1,02	946	
2B	62,00	62,00	61,70	61,90	1.191,2	700,2	1.192,5	492,3	2,420					3,44	902	1,04	940	
2C	62,80	63,00	62,90	62,90	1.188,2	691,7	1.190,8	499,1	2,381					3,39	932	1,01	946	
									2,397	2,52	4,96	14,96	66,83	3,48			944	271
3A	62,30	62,20	62,50	62,33	1.189,9	695,6	1.191,6	496,0	2,399					3,36	972	1,03	1.001	
3B	62,80	62,50	62,60	62,63	1.190,5	695,8	1.191,7	495,9	2,401					3,49	971	1,02	991	
3C	62,90	62,80	62,40	62,70	1.191,6	697,2	1.193,8	496,6	2,400					3,29	977	1,02	997	
									2,400	2,52	4,87	14,88	67,28	3,38			996	295
4A	61,80	61,70	61,50	61,67	1.192,9	700,5	1.194,0	493,5	2,417					3,82	865	1,05	906	
4B	61,90	61,70	61,90	61,83	1.192,1	698,9	1.193,6	494,7	2,410					3,90	878	1,04	916	
4C	61,50	61,50	61,50	61,50	1.190,6	699,0	1.191,5	492,5	2,417					3,72	864	1,05	910	
									2,415	2,52	4,27	14,34	70,23	3,81			911	239
5A	61,70	61,80	61,90	61,80	1.192,3	699,9	1.193,3	493,4	2,416					3,74	1.024	1,04	1.069	
5B	61,90	61,60	62,00	61,83	1.194,5	704,2	1.195,8	491,6	2,430					3,78	1.022	1,04	1.066	
5C	61,80	62,00	62,10	61,97	1.188,6	696,6	1.190,2	493,6	2,408					3,55	1.036	1,04	1.077	
									2,418	2,52	4,14	14,23	70,90	3,69			1.071	290
6A	61,70	61,80	61,50	61,67	1.187,3	695,6	1.188,5	492,9	2,409					2,93	962	1,05	1.009	
6B	62,30	62,20	62,50	62,33	1.194,5	700,8	1.197,4	496,6	2,405					3,19	988	1,03	1.017	
6C	61,90	62,20	62,00	62,03	1.191,3	697,9	1.192,3	494,4	2,410					3,02	975	1,04	1.012	
									2,408	2,52	4,54	14,59	68,85	3,05			1.012	332
7A	61,10	60,70	60,90	60,90	1.190,2	700,7	1.191,9	491,2	2,423					2,95	965	1,07	1.034	
7B	61,50	61,00	61,40	61,30	1.189,1	699,2	1.191,2	492,0	2,417					3,29	971	1,06	1.028	
7C	61,40	61,90	61,80	61,70	1.191,0	701,1	1.193,4	492,3	2,419					3,21	975	1,05	1.021	
									2,420	2,52	4,08	14,17	71,24	3,15			1.028	326
8A	61,80	61,20	61,50	61,50	1.187,2	696,4	1.188,5	492,1	2,413					2,97	933	1,05	983	
8B	61,70	61,80	61,50	61,67	1.192,9	702,7	1.194,8	492,1	2,424					3,02	935	1,05	980	
8C	62,10	61,70	62,10	61,97	1.190,6	697,1	1.191,9	494,8	2,406					3,14	949	1,04	987	
									2,414	2,52	4,29	14,36	70,12	3,04			983	323

Tablo 38. (devami)

9A	62,60	62,20	62,30	62,37	1.185,8	691,5	1.188,3	496,8	2,387						2,54	1.145	1,03	1.178	
9B	62,10	61,80	61,70	61,87	1.196,2	701,6	1.197,7	496,1	2,411						2,77	1.134	1,04	1.183	
9C	61,90	61,50	61,70	61,70	1.187,2	695,9	1.189,0	493,1	2,408						2,62	1.121	1,05	1.174	
									2,402	2,52	4,78	14,80	67,69	2,64				1.178	446
10A	61,90	61,90	62,10	61,97	1.192,7	699,7	1.194,0	494,3	2,413						2,26	1.107	1,04	1.151	
10B	62,40	62,10	62,20	62,23	1.188,6	695,2	1.191,5	496,3	2,395						2,57	1.116	1,03	1.152	
10C	61,80	61,60	62,00	61,80	1.188,1	695,5	1.189,5	494,0	2,405						2,49	1.110	1,04	1.159	
									2,404	2,52	4,69	14,72	68,15	2,44				1.154	474
11A	61,80	62,00	61,90	61,90	1.185,8	694,5	1.188,1	493,6	2,402						2,66	982	1,04	1.023	
11B	61,30	61,80	61,40	61,50	1.186,1	697,8	1.187,7	489,9	2,421						2,54	965	1,05	1.016	
11C	62,20	62,10	62,10	62,13	1.195,1	700,2	1.196,5	496,3	2,408						2,44	992	1,04	1.027	
									2,410	2,52	4,44	14,50	69,36	2,55				1.022	401
12A	61,00	61,10	61,40	61,17	1.186,4	702,8	1.187,3	484,5	2,449						3,49	936	1,06	995	
12B	61,30	61,30	61,40	61,33	1.191,9	701,1	1.192,7	491,6	2,425						3,41	947	1,06	1.002	
12C	61,80	61,90	62,30	62,00	1.194,8	701,9	1.196,4	494,5	2,416						3,63	967	1,04	1.005	
									2,430	2,52	3,68	13,81	73,39	3,51				1.001	285
13A	62,00	61,80	62,20	62,00	1.189,7	696,2	1.190,6	494,4	2,406						2,83	1.025	1,04	1.065	
13B	62,30	62,60	62,50	62,47	1.185,9	690,9	1.189,6	498,7	2,378						2,94	1.029	1,03	1.056	
13C	62,00	61,70	62,10	61,93	1.190,0	697,8	1.191,9	494,1	2,408						3,13	1.025	1,04	1.067	
									2,398	2,52	4,95	14,95	66,88	2,97				1.062	358
14A	62,30	62,20	62,40	62,30	1.183,2	689,4	1.185,6	496,2	2,385						3,25	1.035	1,03	1.067	
14B	61,90	62,00	61,90	61,93	1.190,6	698,0	1.192,3	494,3	2,409						3,34	1.035	1,04	1.077	
14C	61,60	61,80	61,70	61,70	1.186,8	694,3	1.187,5	493,2	2,406						3,32	1.024	1,05	1.073	
									2,400	2,52	4,86	14,87	67,30	3,30				1.072	325
15A	62,10	62,20	62,50	62,27	1.191,1	698,6	1.192,3	493,7	2,413						3,59	925	1,03	954	
15B	61,60	61,70	62,00	61,77	1.190,1	700,2	1.192,3	492,1	2,418						3,64	924	1,05	966	
15C	61,20	61,00	61,20	61,13	1.169,1	684,4	1.171,6	487,2	2,400						3,71	905	1,06	963	
									2,410	2,52	4,45	14,51	69,31	3,65				961	264
16A	61,20	61,00	60,90	61,03	1.186,5	699,1	1.188,5	489,4	2,424						3,74	894	1,07	954	
16B	61,20	60,90	61,20	61,10	1.187,9	700,4	1.190,7	490,3	2,423						3,60	900	1,07	959	
16C	61,10	61,40	61,30	61,27	1.189,9	699,6	1.191,9	492,3	2,417						3,64	902	1,06	957	
									2,421	2,52	4,01	14,11	71,59	3,66				957	261
Specification Limits											4-6	13-15	60-75	2-4				> 750	

Marshall Stabilite deneylerinde stabilitenin maksimum olması için en büyük-en iyi performans istatistiği seçilerek Taguchi yöntemi ile önce her deney için S/N değerleri hesaplanmıştır. S/N değerleri hesaplandıktan sonra parametrelerin seviyelere göre ortalama S/N değerleri hesap edilerek Tablo 39’da verilmiştir. Tablo verilenlere göre grafenin 3.seviyesi (A3), yağın 1.seviyesi (B1), sıcaklığın 3.seviyesi (C3) ve sürenin 3. Seviyesi (D3) en yüksek ortalama S/N etkilerine sahiptir.

Tablo 39. Marshall Stabilite Deneylerinde Ortalama S/N etkileri

Ortalama S/N Etkileri				
	Grafen	Yağ	Sıcaklık	Süre
1. Seviye	59,55	60,52	59,87	60,10
2. Seviye	60,20	60,36	59,94	60,02
3. Seviye	60,72	60,01	60,46	60,36
4. Seviye	60,10	59,67	60,30	60,09

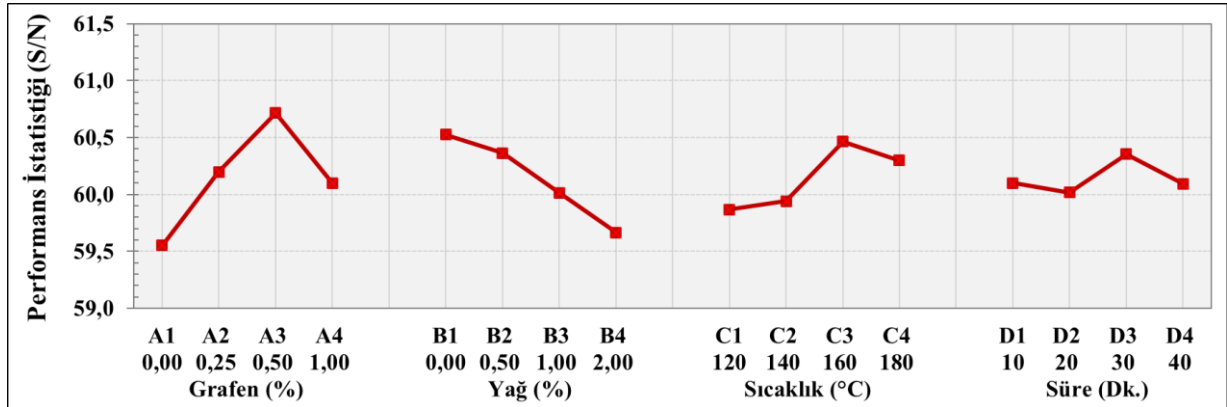
Ortalama S/N etkileri belirlendikten sonra marshall stabilite deneyinin performans tahminleri yapılmıştır. Performans tahminleri Tablo 40’ta verilmiştir. Parametrelerin S/N’e katkıları incelendiğinde stabilite sonuçlarına en yüksek etkiye sahip parametrelerin sırasıyla grafen, kenevir yağı, sıcaklık ve süre olduğu bulunmuştur.

Tablo 40. Marshall Stabilite İçin Performans Tahminleri

Parametreler	Seviyeler	S/N üzerine etki
Grafen	A3	0,574
Yağ	B1	0,383
Sıcaklık	C3	0,321
Süre	D3	0,213
Tüm Faktörlerin Katkısı (S/N)		1,491
Ortalama Performans İstatistiği (S/N)		60,142
Optimum Şartlarda Beklenen Değer (S/N) / (Kg)		61,633 / 1206,802
Doğrulama Deneyi Sonucu (S/N) / (Kg)		61,44 / 1180,50
Güven Aralığı ($\alpha=95\%$) (S/N)		61,347 / 61,918

Stabilite sonuçları için en büyük-en iyi performans istatistiğine göre optimum seviyeler A3 (Grafen %0,5), B1 (Kenevir yağı %0), C3 (160 °C) ve D3 (30 dk.) olarak bulunmuştur. Taguchi yöntemi ile %95 güven aralığında yapılan tahmine göre S/N değeri 61,347 ile 61,918 arasında olmalıdır. Deney planında optimum seviyelerin bir arada olduğu bir deney bulunmadığı için doğrulama deneyi yapılmıştır. Öncelikle “A3, B1, C3, D3” parametre seviyelerine göre modifiye bitüm hazırlanmış ve ardından Marshall stabilite deneyi yapılarak

stabilite değeri bulunmuştur. Doğrulama deneyi sonucunda 1206,802 kg stabilite değeri elde edilmiştir ve S/N değeri 61,44 olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan S/N değeri 61,347 ile 61,918 arasında olduğundan sonuç %95 güven aralığında doğrudur.



Şekil 44. Marshall Stabilite deneylerinde performans istatistiği

Şekil 44'te Marshall stabilite deneyinin stabilite sonuçlarına göre ortalama performans istatistikleri grafik olarak verilmiştir. Grafen katkısının kullanılması stabilite değerini artırmıştır en büyük artış %0,5 oranında kullanılması ile yaşanmıştır. Yağ katkısı eklenmesi stabilite değerini azaltmıştır. Sıcaklık artışı stabilite değerini arttırsa da en büyük artış 3.seviyede olmuştur. Süre 3.seviyede stabilite değerini artırırken diğer seviyelerde benzer etkiler göstermiştir.

Tablo 41. Marshall Stabilite Deneylerine Ait ANOVA Tablosu

Parametreler	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Varyans	F-Değeri	Net Toplam	Katkı	P-Değeri
Grafen	3	2,726	0,909	98,484	2,698	47,44%	0,002
Yağ	3	1,755	0,585	63,416	1,728	30,55%	0,003
Sıcaklık	3	0,977	0,326	35,308	0,950	17,01%	0,008
Süre	3	0,260	0,087	9,389	0,232	4,52%	0,048
Hata	3	0,028	0,009			0,48%	
Toplam	15	5,746				100	

Stabilite değerlerinin istatistiksel açıdan anlamlılığın belirlenmesi amacıyla ANOVA analizi yapılarak Tablo 41'de verilmiştir. Tüm parametrelerin P değerlerinin 0,05'ten küçük ve F değerlerinin 9,277'den büyük olması istatistiksel olarak deneylerin geçerli olduğunu göstermektedir. ANOVA tablosuna göre deney sonuçlarına en fazla katkıyı %47,44 oranıyla grafen ve %30,55 oranıyla kenevir yağı sağlamaktadır. Sıcaklık %17,01 oranında, süre ise %4,52 oranında katkıya sahiptir.

Marshall stabilite deneyleri parametreler ve seviyelerine göre incelendiğinde; Grafen katkısının eklenmesi akma miktarını her seviyede azaltmış olsa da en fazla azalış miktarı 3.seviyede gerçekleşmiştir. Marshall katsayıları (MQ) incelendiğinde ise grafenin MQ değerini artırdığı görülmektedir. En büyük artış 3.seviyede gerçekleşmiştir. Kenevir yağı katkısının akma miktarında grafen kadar etkisi olmamıştır. Ayrıca kenevir yağı eklenmesi akma miktarını az bir miktar artırdığı görülmüştür. Marshall katsayısını ise kenevir yağının 1. ve 2.seviyelerde çok değiştirmedeği ancak 3. ve 4.seviyelerde azalttığı görülmüştür. Marshall katsayısının büyüklüğü ile kalıcı deformasyon direncinin yüksek olması arasında sıklıkla doğrusal ilişki kurulmaktadır (Morova *et al.* 2016) (Adnan *et al.* 2022). Buna göre grafen katkı maddesinin kullanımının kalıcı deformasyon direncini artırdığı ve kenevir yağının kalıcı deformasyon direncini azalttığı ifade edilebilir.

0°C Sıcaklıkta Yarım Daire Eğilme Deneyi (SCB) Sonuçları

0°C Sıcaklıkta yapılan yarım daire eğilme deneylerinde 16 karışımın her biri için üçer numune kullanılmış ve kırılma toklukları hesap edilerek ortalamaları alınmıştır. Deney sonuçları ve S/N etkileri Tablo 42’de verilmiştir

Tablo 42. 0°C SCB Deney Sonuçları ve S/N Etkileri

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
K_{İC}	23,13	25,93	24,15	23,86	23,08	23,89	25,05	25,40	18,18	20,90	22,47	18,72	19,08	16,92	16,75	17,36
S/N	27,28	28,28	27,66	27,55	27,27	27,57	27,97	28,09	25,19	26,40	27,03	25,45	25,61	24,57	24,48	24,79

0°C Sıcaklıkta yapılan yarım daire eğilme deneylerinde kırılma tokluğunun (K_{İC}) maksimum olması için en büyük-en iyi performans istatistiği seçilerek Taguchi yöntemi ile önce her deney için S/N değerleri hesaplanmıştır. S/N değerleri hesaplandıktan sonra parametrelerin seviyelere göre ortalama S/N değerleri hesap edilerek Tablo 43’te verilmiştir. Tablo verilenlere göre grafenin 2.seviyesi (A2), yağın 3.seviyesi (B3), sıcaklığın 4.seviyesi (C4) ve sürenin 2.seviyesi (D2) en yüksek ortalama S/N etkilerine sahiptir.

Tablo 43. 0°C Yarım Daire Eğilme Deneylerinde Ortalama S/N Etkileri

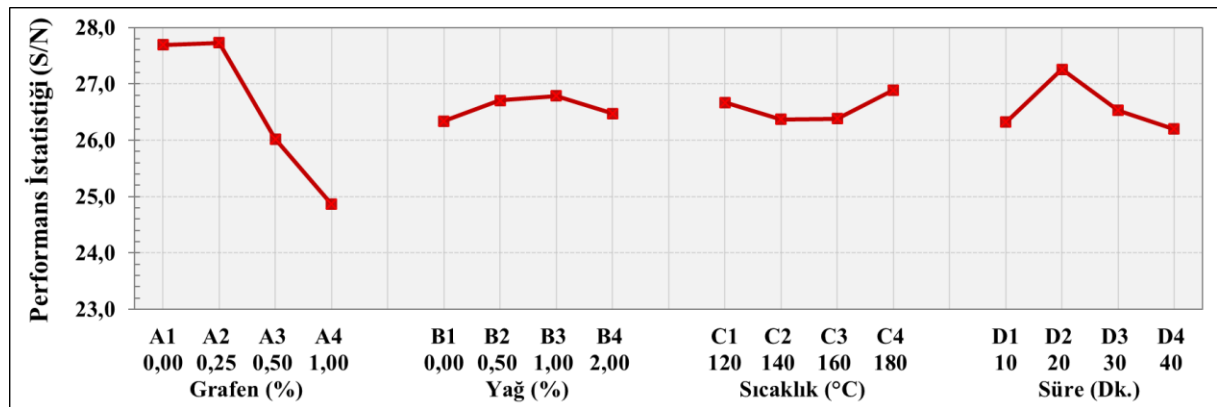
	Ortalama S/N Etkileri			
	Grafen	Yağ	Sıcaklık	Süre
1. Seviye	27,693	26,338	26,667	26,318
2. Seviye	27,725	26,704	26,367	27,253
3. Seviye	26,018	26,786	26,379	26,529
4. Seviye	24,863	26,471	26,886	26,197

Ortalama S/N etkileri belirlendikten sonra 0°C sıcaklıkta yarım daire eğilme deneyinin performans tahminleri yapılmıştır. Performans tahminleri Tablo 44’te verilmiştir. Parametrelerin S/N’e katkıları incelendiğinde kırılma tokluğu sonuçlarına en yüksek etkiye sahip parametrelerin sırasıyla grafen, süre, sıcaklık ve yağ olduğu bulunmuştur.

Tablo 44. 0°C SCB Kırılma Tokluğu İçin Performans Tahminleri

Parametreler	Seviyeler	S/N üzerine etki
Grafen	A2	1,151
Yağ	B3	0,211
Sıcaklık	C4	0,311
Süre	D2	0,679
Tüm Faktörlerin Katkısı (S/N)		2,352
Ortalama Performans İstatistiği (S/N)		26,575
Optimum Şartlarda Beklenen Değer (S/N) / (Mpa√m)		28,926 / 27,945
Doğrulama Deneyi Sonucu (S/N) / (Mpa√m)		29,02 / 28,24
Güven Aralığı (α=95%) (S/N)		28,803 - 29,049

0°C sıcaklıkta SCB kırılma tokluğu sonuçları için en büyük-en iyi performans istatistiğine göre optimum seviyeler A2 (Grafen %0,25), B3 (Kenevir yağı %1), C4 (180 °C) ve D2 (20 dk.) olarak bulunmuştur. Taguchi yöntemi ile %95 güven aralığında yapılan tahmine göre S/N değeri 28,803 ile 29,049 arasında olmalıdır. Deney planında optimum seviyelerin bir arada olduğu bir deney bulunmadığı için doğrulama deneyi yapılmıştır. Öncelikle “A2, B3, C4, D2” parametre seviyelerine göre modifiye bitüm hazırlanmış ve ardından 0°C sıcaklıkta SCB deneyi yapılarak kırılma tokluğu değeri hesaplanmıştır. Doğrulama deneyi sonucunda 28,24 Mpa√m kırılma tokluğu değeri elde edilmiştir ve S/N değeri 29,018 olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan S/N değeri 28,803 ile 29,049 arasında olduğundan sonuç %95 güven aralığında doğrudur.



Şekil 45. 0°C SCB deneylerinde performans istatistiği

Şekil 45'te 0°C sıcaklıkta yapılan SCB deneyinin kırılma tokluğu değerlerine göre ortalama performans istatistikleri grafik olarak verilmiştir. Grafen katkısının kullanılması kırılma tokluğu değerini azaltmıştır özellikle en büyük azalış %1 oranında kullanılması ile yaşanmıştır. Yağ katkısı eklenmesi kırılma tokluğu değerini %2 oranına kadar artırmış %2 oranında ise bir miktar azaltmıştır. Sıcaklık artışı kırılma tokluğu değerini 4. Seviyede artırmış diğer seviyelerde ise fazla değişikliğe uğratmamıştır. Süre 2. ve 3.seviyede kırılma tokluğu değerini artırırken 1. ve 2.seviye benzer etki göstermiştir.

Tablo 45. 0°C SCB Deneylerine Ait ANOVA Tablosu

Parametreler	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Varyans	F-Değeri	Net Toplam	Katkı	P-Değeri
Grafen	3	23,255	7,752	4.500,667	23,250	85,49%	0,0000
Yağ	3	0,511	0,170	98,933	0,506	1,88%	0,0017
Sıcaklık	3	0,749	0,250	144,877	0,743	2,75%	0,0010
Süre	3	2,683	0,894	519,199	2,678	9,86%	0,0001
Hata	3	0,005	0,002			0,02%	
Toplam	15	27,203				100	

0°C'de SCB kırılma tokluğu değerlerinin istatistiksel açıdan anlamlılığın belirlenmesi amacıyla ANOVA analizi yapılarak Tablo 45'te verilmiştir. Tüm parametrelerin P değerlerinin 0,05'ten küçük ve F değerlerinin 9,277'den büyük olması istatistiksel olarak deneylerin geçerli olduğunu göstermektedir. ANOVA tablosuna göre deney sonuçlarına en fazla katkıyı %85,49 oranıyla grafen ve %9,86 oranıyla süre sağlamaktadır. Sıcaklık %2,75 oranında, kenevir tohumu yağı ise %4,52 oranında katkıya sahiptir. 0°C Sıcaklıkta kırılan SCB numunelerinin görseli Şekil 46'da verilmiştir.



Şekil 46. 0°C Sıcaklıkta kırılan SCB numuneleri

-20°C Sıcaklıkta Yarım Daire Eğilme Deneyi (SCB) Sonuçları

-20°C Sıcaklıkta yapılan yarım daire eğilme deneylerinde 16 karışımın her biri için üçer numune kullanılmış ve kırılma toklukları hesap edilerek ortalamaları alınmıştır. Deney sonuçları ve S/N etkileri Tablo 46'da verilmiştir

Tablo 46. -20°C SCB Deney Sonuçları ve S/N Etkileri

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
K_{IC}	19,61	21,60	22,03	20,89	24,23	24,98	28,99	26,98	20,56	27,05	25,84	23,20	25,24	24,12	22,45	24,47
S/N	25,85	26,69	26,86	26,40	27,69	27,95	29,25	28,62	26,26	28,64	28,25	27,31	28,04	27,65	27,02	27,77

-20°C sıcaklıkta yarım daire eğilme deneylerinde kırılma tokluğunun (K_{IC}) maksimum olması için en büyük-en iyi performans istatistiği seçilerek Taguchi yöntemi ile önce her deney için S/N değerleri hesaplanmıştır. S/N değerleri hesaplandıktan sonra parametrelerin seviyelere göre ortalama S/N değerleri hesap edilerek Tablo 47'de verilmiştir. Tablo verilenlere göre grafenin 2.seviyesi (A2), yağın 3.seviyesi (B3), sıcaklığın 4.seviyesi (C4) ve sürenin 2.seviyesi (D2) en yüksek ortalama S/N etkilerine sahiptir.

Tablo 47. -20°C Yarım Daire Eğilme Deneğinde Ortalama S/N Etkileri

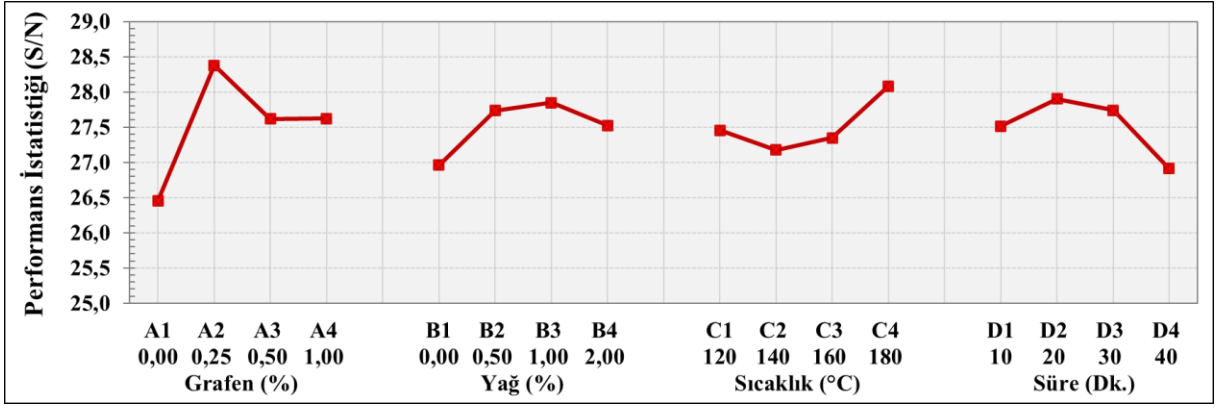
Ortalama S/N Etkileri				
	Grafen	Yağ	Sıcaklık	Süre
1. Seviye	26,450	26,960	27,455	27,513
2. Seviye	28,375	27,733	27,177	27,899
3. Seviye	27,615	27,844	27,347	27,741
4. Seviye	27,621	27,525	28,082	26,909

Ortalama S/N etkileri belirlendikten sonra -20°C sıcaklıkta yapılan yarım daire eğilme deneyinin performans tahminleri yapılmıştır. Performans tahminleri Tablo 48’de da verilmiştir. Parametrelerin S/N’e katkıları incelendiğinde kırılma tokluğu sonuçlarına en yüksek etkiye sahip parametrelerin sırasıyla grafen, sıcaklık, süre ve kenevir yağı olduğu bulunmuştur.

Tablo 48. -20°C SCB Kırılma Tokluğu İçin Performans Tahminleri

Parametreler	Seviyeler	S/N üzerine etki
Grafen	A2	0,860
Yağ	B3	0,329
Sıcaklık	C4	0,567
Süre	D2	0,384
Tüm Faktörlerin Katkısı (S/N)		2,140
Ortalama Performans İstatistiği (S/N)		27,516
Optimum Şartlarda Beklenen Değer (S/N) / (Mpa√m)		29,655 / 30,392
Doğrulama Deneyi Sonucu (S/N) / (Mpa√m)		29,54 / 29,99
Güven Aralığı (α=95%) (S/N)		29,503 / 29,807

SCB kırılma tokluğu sonuçları için en büyük-en iyi performans istatistiğine göre optimum seviyeler A2 (Grafen %0,25), B3 (Kenevir yağı %1), C4 (180 °C) ve D2 (20 dk.) olarak bulunmuştur. Taguchi yöntemi ile %95 güven aralığında yapılan tahmine göre S/N değeri 29,503 ile 29,807 arasında olmalıdır. Deney planında optimum seviyelerin bir arada olduğu bir deney bulunmadığı için doğrulama deneyi yapılmıştır. Öncelikle “A2, B3, C4, D2” parametre seviyelerine göre modifiye bitüm hazırlanmış ve ardından SCB deneyi yapılarak kırılma tokluğu değeri hesaplanmıştır. Doğrulama deneyi sonucunda 29,99 Mpa√m kırılma tokluğu değeri elde edilmiştir ve S/N değeri 29,54 olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan S/N değeri 29,503 ile 29,807 arasında olduğundan sonuç %95 güven aralığında doğrudur.



Şekil 47. -20°C SCB deneylerinde performans istatistiği

Şekil 47’de -20°C SCB deneyinin kırılma tokluğu değerlerine göre ortalama performans istatistikleri grafik olarak verilmiştir. Grafen katkısının kullanılması -20°C sıcaklıkta kırılma tokluğu değerini artırmıştır, özellikle en büyük artış %0,25 oranında kullanılması ile yaşanmıştır. Yağ katkısı eklenmesi kırılma tokluğunu artırmıştır. Sıcaklık artışı ilk üç seviyede benzer etkiye sahipken son seviyede kırılma tokluğunun artmasını sağlamıştır. Süre 2. ve 3.seviyede kırılma tokluğunu artırırken 4.seviyede azaltmıştır.

Tablo 49. -20°C SCB deneylerine ait ANOVA tablosu

Parametreler	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Varyans	F-Değeri	Net Toplam	Katkı	P-Değeri
Grafen	3	7,583	2,528	967,141	7,575	55,82%	0,0001
Yağ	3	1,858	0,619	236,931	1,850	13,67%	0,0005
Sıcaklık	3	1,871	0,624	238,617	1,863	13,77%	0,0005
Süre	3	2,265	0,755	288,938	2,258	16,68%	0,0003
Hata	3	0,008	0,003			0,06%	
Toplam	15	13,585				100	

SCB kırılma tokluğu değerlerinin istatistiksel açıdan anlamlılığın belirlenmesi amacıyla ANOVA analizi yapılarak Tablo 49’da verilmiştir. Tüm parametrelerin P değerlerinin 0,05’ten küçük ve F değerlerinin 9,277’den büyük olması istatistiksel olarak deneylerin geçerli olduğunu göstermektedir. ANOVA tablosuna göre deney sonuçlarına en fazla katkıyı %55,82 oranıyla grafen sağlamaktadır. Süre %16,68 oranında, sıcaklık %13,77 ve yağ %13,67 oranında katkıya sahiptir. -20°C Sıcaklıkta kırılan SCB numunelerinin görseli Şekil 48’de verilmiştir.



Şekil 48. -20°C Sıcaklıkta kırılan SCB numuneleri

0°C Sıcaklıkta Kiriş Eğilme Deneyi (SENB) Sonuçları

0°C Sıcaklıkta yapılan kiriş eğilme deneylerinde 16 karışımın her biri için üçer numune kullanılmış ve kırılma toklukları hesap edilerek ortalamaları alınmıştır. Deney sonuçları ve S/N etkileri Tablo 50’de verilmiştir

Tablo 50. 0°C SENB Deney Sonuçları ve S/N Etkileri

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
K_{IC}	28,12	28,01	29,91	23,09	27,05	25,06	27,75	26,34	22,34	22,34	24,60	24,88	24,25	27,33	24,78	23,88
S/N	28,98	28,95	29,52	27,27	28,64	27,98	28,86	28,41	26,98	26,98	27,82	27,92	27,69	28,73	27,88	27,56

0°C sıcaklıkta yapılan kiriş eğilme deneylerinde kırılma tokluğunun (K_{IC}) maksimum olması için en büyük-en iyi performans istatistiği seçilerek Taguchi yöntemi ile önce her deney için S/N değerleri hesaplanmıştır. S/N değerleri hesaplandıktan sonra parametrelerin seviyelere göre ortalama S/N değerleri hesap edilerek Tablo 51’de verilmiştir. Tablo verilenlere göre grafenin 1.seviyesi (A1), yağın 3.seviyesi (B3), sıcaklığın 3.seviyesi (C3) ve sürenin 1.seviyesi (D1) en yüksek ortalama S/N etkilerine sahiptir.

Tablo 51. Kiriş Eğilme Deneylerinde Ortalama S/N Etkileri

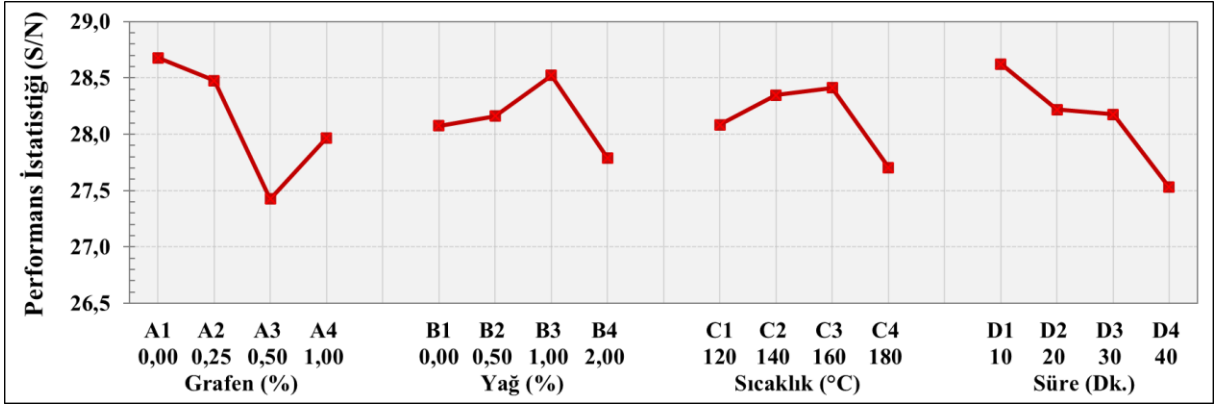
Ortalama S/N Etkileri				
	Grafen	Yağ	Sıcaklık	Süre
1. Seviye	28,678	28,075	28,085	28,623
2. Seviye	28,475	28,159	28,347	28,217
3. Seviye	27,425	28,521	28,411	28,176
4. Seviye	27,967	27,790	27,702	27,529

Ortalama S/N etkileri belirlendikten sonra 0°C’de yapılan kiriş eğilme deneyinin performans tahminleri yapılmıştır. Performans tahminleri Tablo 52’de verilmiştir. Parametrelerin S/N’e katkıları incelendiğinde kırılma tokluğu sonuçlarına en yüksek etkiye sahip parametrelerin sırasıyla grafen, süre, kenevir yağı ve sıcaklık olduğu bulunmuştur.

Tablo 52. 0°C SENB Kırılma Tokluğu İçin Performans Tahminleri

Parametreler	Seviyeler	S/N üzerine etki
Grafen	A1	0,542
Yağ	B3	0,384
Sıcaklık	C3	0,275
Süre	D1	0,487
Tüm Faktörlerin Katkısı (S/N)		1,689
Ortalama Performans İstatistiği (S/N)		28,136
Optimum Şartlarda Beklenen Değer (S/N) / (Mpa√m)		29,825 / 30,991
Doğrulama Deneyi Sonucu (S/N) / (Mpa√m)		29,68 / 30,49
Güven Aralığı (α=95%) (S/N)		29,255 / 30,395

0°C SENB kırılma tokluğu sonuçları için en büyük-en iyi performans istatistiğine göre optimum seviyeler A1 (Grafen %0), B3 (Kenevir yağı %1), C3 (160 °C) ve D1 (10 dk.) olarak bulunmuştur. Taguchi yöntemi ile %95 güven aralığında yapılan tahmine göre S/N değeri 29,255 ile 30,395 arasında olmalıdır. Deney planında optimum seviyelerin bir arada olduğu bir deney bulunmadığı için doğrulama deneyi yapılmıştır. Öncelikle “A1, B3, C3, D1” parametre seviyelerine göre modifiye bitüm hazırlanmış ve ardından 0°C sıcaklıkta SENB deneyi yapılarak kırılma tokluğu değeri hesaplanmıştır. Doğrulama deneyi sonucunda 30,49 Mpa√m kırılma tokluğu değeri elde edilmiştir ve S/N değeri 29,68 olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan S/N değeri 29,255 ile 30,395 arasında olduğundan sonuç %95 güven aralığında doğrudur.



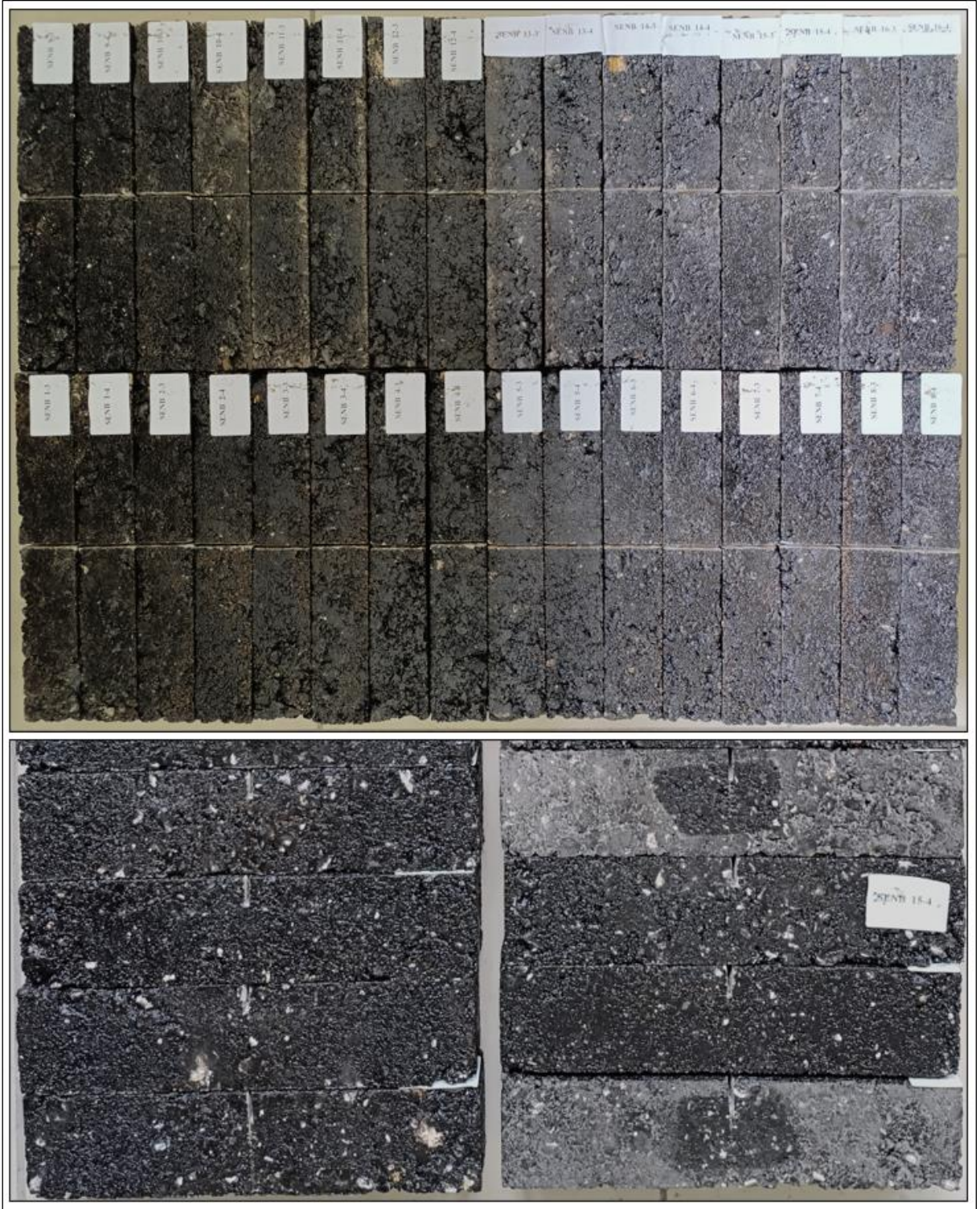
Şekil 49. 0°C SENB deneylerinde performans istatistiği

Şekil 49’da 0°C SENB deneyinin kırılma tokluğu değerlerine göre ortalama performans istatistikleri grafik olarak verilmiştir. Grafen katkısının kullanılması 0°C sıcaklıkta kırılma tokluğunu azaltmıştır. Yağ katkısının kullanılması kırılma tokluğu değerini 3.seviyede artırmış, 4.seviyede ise azaltmıştır. Sıcaklık artışı kırılma tokluğunu 2. ve 3.seviyede artırmış son seviyede ise azaltmıştır. Süre arttıkça kırılma tokluğu değeri azalmıştır.

Tablo 53. 0°C SENB Deneylerine Ait ANOVA Tablosu

Parametreler	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Varyans	F-Değeri	Net Toplam	Katkı	P-Değeri
Grafen	3	3,772	1,257	34,185	3,661	43,50%	0,0081
Yağ	3	1,088	0,363	9,860	0,978	12,55%	0,0461
Sıcaklık	3	1,244	0,415	11,278	1,134	14,35%	0,0385
Süre	3	2,457	0,819	22,265	2,346	28,33%	0,0149
Hata	3	0,110	0,037			1,27%	
Toplam	15	8,671				100	

SENB kırılma tokluğu değerlerinin istatistiksel açıdan anlamlılığın belirlenmesi amacıyla ANOVA analizi yapılarak Tablo 53’te verilmiştir. Tüm parametrelerin P değerlerinin 0,05’ten küçük ve F değerlerinin 9,277’den büyük olması istatistiksel olarak deneylerin geçerli olduğunu göstermektedir. ANOVA tablosuna göre deney sonuçlarına en fazla katkıyı %43,50 oranıyla grafen ve %28,33 oranıyla süre sağlamaktadır. Sıcaklık %14,35 oranında, süre ise %12,55 oranında katkıya sahiptir. 0°C Sıcaklıkta kırılan SENB numunelerinin görseli Şekil 50’de verilmiştir.



Şekil 50. 0°C Sıcaklıkta kırılan SENB numuneleri

-20°C sıcaklıkta Kiriş Eğilme Deneyi (SENB) Sonuçları

-20°C Sıcaklıkta yapılan kiriş eğilme deneylerinde 16 karışımın her biri için üçer numune kullanılmış ve kırılma toklukları hesap edilerek ortalamaları alınmıştır. Deney sonuçları ve S/N etkileri Tablo 54'te verilmiştir.

Tablo 54. -20°C SENB Deney Sonuçları ve s/n Etkileri

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
K_{1c}	25,33	22,56	25,80	27,74	25,40	25,74	27,71	28,54	26,40	26,38	25,63	27,70	28,79	28,96	27,91	31,33
S/N	28,07	27,07	28,23	28,86	28,10	28,21	28,85	29,11	28,43	28,43	28,17	28,85	29,19	29,24	28,91	29,92

-20°C’de yapılan kiriş eğilme deneylerinde kırılma tokluğunun (K_{1c}) maksimum olması için en büyük-en iyi performans istatistiği seçilerek Taguchi yöntemi ile önce her deney için S/N değerleri hesaplanmıştır. S/N değerleri hesaplandıktan sonra parametrelerin seviyelere göre ortalama S/N değerleri hesap edilerek Tablo 55’te verilmiştir. Tablo verilenlere göre grafenin 4.seviyesi (A4), yağın 4.seviyesi (B4), sıcaklığın 4.seviyesi (C4) ve sürenin 1.seviyesi (D1) en yüksek ortalama S/N etkilerine sahiptir.

Tablo 55. -20°C Kiriş Eğilme Deneylerinde Ortalama S/N Etkileri

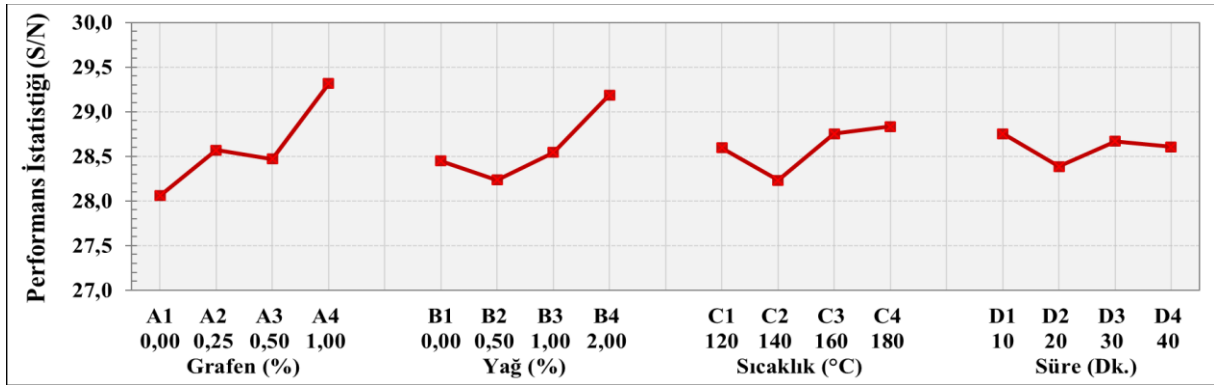
	Ortalama S/N Etkileri			
	Grafen	Yağ	Sıcaklık	Süre
1. Seviye	28,059	28,447	28,595	28,753
2. Seviye	28,568	28,235	28,232	28,384
3. Seviye	28,470	28,544	28,753	28,668
4. Seviye	29,314	29,185	28,832	28,606

Ortalama S/N etkileri belirlendikten sonra -20°C sıcaklıkta yapılan kiriş eğilme deneyinin performans tahminleri yapılmıştır. Performans tahminleri Tablo 56’da da verilmiştir. Parametrelerin S/N’e katkıları incelendiğinde kırılma tokluğu sonuçlarına en yüksek etkiye sahip parametrelerin sırasıyla grafen, kenevir tohumu yağı, sıcaklık ve süre olduğu bulunmuştur.

Tablo 56. -20°C SENB Kırılma Tokluğu İçin Performans Tahminleri

Parametreler	Seviler	S/N üzerine etki
Grafen	A4	0,711
Yağ	B4	0,582
Sıcaklık	C4	0,229
Süre	D1	0,150
Tüm Faktörlerin Katkısı (S/N)		1,673
Ortalama Performans İstatistiği (S/N)		28,603
Optimum Şartlarda Beklenen Değer (S/N) / (Mpa√m)		30,276 / 32,643
Doğrulama Deneyi Sonucu (S/N) / (Mpa√m)		30,41 / 33,14
Güven Aralığı (α=95%) (S/N)		30,108/ 30,443

-20°C’de yapılan SENB kırılma tokluğu sonuçları için en büyük-en iyi performans istatistiğine göre optimum seviyeler A4 (Grafen %1), B4 (Kenevir yağı %2), C4 (180 °C) ve D1 (10 dk.) olarak bulunmuştur. Taguchi yöntemi ile %95 güven aralığında yapılan tahmine göre S/N değeri 30,108 ile 30,443 arasında olmalıdır. Deney planında optimum seviyelerin bir arada olduğu bir deney bulunmadığı için doğrulama deneyi yapılmıştır. Öncelikle “A4, B4, C4, D1” parametre seviyelerine göre modifiye bitüm hazırlanmış ve ardından -20°C sıcaklıkta SENB deneyi yapılarak kırılma tokluğu değeri hesaplanmıştır. Doğrulama deneyi sonucunda $33,14 \text{ Mpa}\sqrt{m}$ kırılma tokluğu değeri elde edilmiştir ve S/N değeri 30,41 olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan S/N değeri 30,108 ile 30,443 arasında olduğundan sonuç %95 güven aralığında doğrudur.



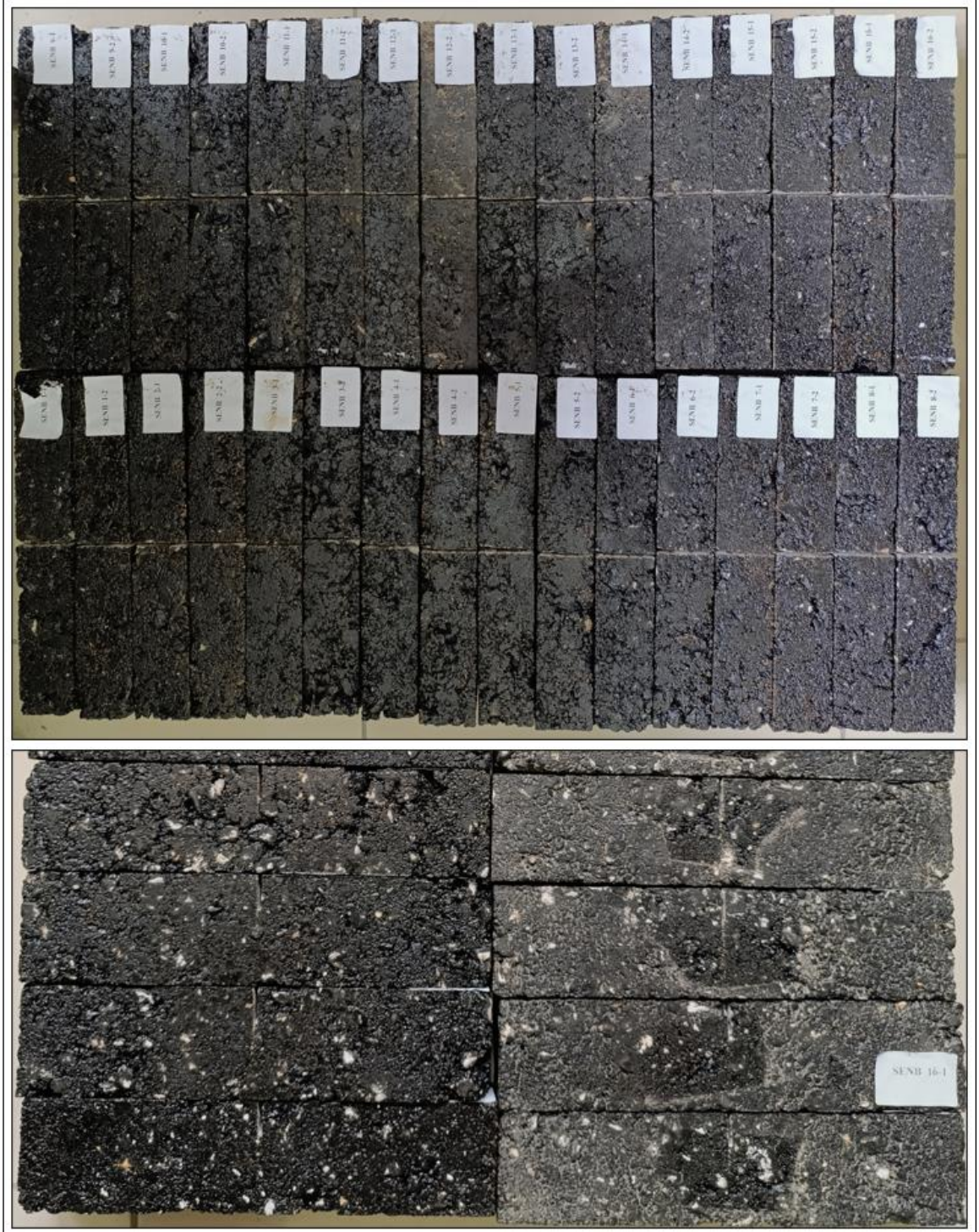
Şekil 51. -20°C SENB deneylerinde performans istatistiği

Şekil 51’de -20°C sıcaklıkta yapılan SENB deneyinin kırılma tokluğu değerlerine göre ortalama performans istatistikleri grafik olarak verilmiştir. Grafen katkısının kullanılması kırılma tokluğunu artırmıştır ve en büyük artış %1 oranında kullanılması ile yaşanmıştır. Yağ katkısı eklenmesi kırılma tokluğunu 4.seviyede önemli miktarda artırırken diğer seviyelerin etkisi birbirlerine yakın olmuştur. Sıcaklık RTFOT sonrası penetrasyonun davranışına benzer bir davranış göstererek kırılma tokluğunu 2.seviyede bir miktar azaltmıştır. 3. ve 4.seviyelerde ise bir miktar kırılma tokluğunu artırmıştır. Sürenin artışı ise kırılma tokluğu değerlerini düşürmüştür.

Tablo 57. -20°C SENB Deneylerine Ait ANOVA Tablosu

Parametreler	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Varyans	F-Değeri	Net Toplam	Katkı	P-Değeri
Grafen	3	3,280	1,093	345,078	3,270	50,88%	0,0003
Yağ	3	2,007	0,669	211,149	1,997	31,13%	0,0005
Sıcaklık	3	0,851	0,284	89,495	0,841	13,20%	0,0020
Süre	3	0,299	0,100	31,459	0,290	4,64%	0,0091
Hata	3	0,010	0,003			0,15%	
Toplam	15	6,446				100	

-20°C SENB kırılma tokluğu değerlerinin istatistiksel açıdan anlamlılığın belirlenmesi amacıyla ANOVA analizi yapılarak Tablo 57’de verilmiştir. Tüm parametrelerin P değerlerinin 0,05’ten küçük ve F değerlerinin 9,277’den büyük olması istatistiksel olarak deneylerin geçerli olduğunu göstermektedir. ANOVA tablosuna göre deney sonuçlarına en fazla katkıyı %50,88 oranıyla grafen ve %31,13 oranıyla kenevir tohumu yağı sağlamaktadır. Sıcaklık %13,2 oranında, süre ise %4,64 oranında katkıya sahiptir. -20°C Sıcaklıkta kırılan SENB numunelerinin görseli Şekil 52’de verilmiştir.



Şekil 52. -20°C Sıcaklıkta kırılan SENB numuneleri

Çoklu Yanıt Performans İndeksi (MRPI) ile Optimizasyon

Çalışmada Taguchi yöntemi kullanılarak RTFOT öncesi penetrasyon, RTFOT sonrası penetrasyon, RTFOT öncesi yumuşama noktası, RTFOT sonrası yumuşama noktası, RTFOT kütle kaybı, elastik geri dönme, Marshall stabilite, 0°C SCB, -20°C SCB, 0°C SENB ve -20°C SENB deneylerinin her biri için optimum seviyeler belirlenerek bitüm veya bitümlü karışımın özellikleri iyileştirilmiştir. Ancak bitüm ya da bitümlü karışımların tek bir özelliğinin iyileştirilmesi kaplamanın performansını genel olarak iyileştirmeyebilir. Bunun için yapılan deneylerin çok yanıtlı problem olarak ele alınması gerekmektedir. Çok yanıtlı problemlerin çözümünde araştırmacılar farklı yöntemler kullanarak problemleri analiz etmişlerdir. Bazı araştırmacılar çoklu yanıt performans indeksi ağırlık atama yönteminde, Taguchi yöntemi ile elde edilen performans istatistiği değerlerini kullanarak tek bir yanıt elde etmişlerdir(Çolak *et al.* 2023).(Jeyapaul *et al.* 2005).

Çalışmada bitüm veya bitümlü karışımların, incelenen tüm özelliklerinin iyileştirilebilmesini sağlayacak optimum seviyeleri belirlemek için çoklu yanıt indeksi ağırlık atama yöntemi (MRPI) kullanılmıştır(Krishnaiah and Shahabudeen, 2012). MRPI için; RTFOT öncesi-sonrası penetrasyon, elastik geri dönme, Marshall stabilite, 0°C SCB, -20°C SCB, 0°C SENB ve -20°C SENB deneylerinin en büyük-en iyi performans istatistiği alınmıştır. RTFOT öncesi-sonrası yumuşama noktası ve RTFOT kütle kaybı deneylerinin ise en küçük-en iyi performans istatistikleri MRPI için alınmıştır. Ağırlıklar belirlenirken en büyük-en iyi istatistiği seçilen deneylerde (S/N değerleri pozitif olan) her karışımın S/N değeri o deneydeki S/N değerlerinin toplamına bölünerek hesap edilmiştir. En küçük- en iyi performans istatistiği seçilen deneylerde (S/N değerleri negatif) ise her karışımın S/N değerlerinin -1 üssü alınarak o deneydeki S/N değerlerinin -1 üslerinin toplamına bölünerek (ters normalizasyon prosedürü ile) hesap edilmiştir. Çoklu yanıt performans indeksi ağırlık atama yönteminde, optimum seviyeleri belirlemek için maksimum MRPI değerlerine göre hesaplar yapılmıştır. Ağırlık atama yöntemine göre hesap edilen ağırlıklar, S/N ve MRPI değerleri Tablo 58’de verilmiştir.

Tablo 58. Çoklu Yanıt Performans İndeksi

Deney No	RTFOT Öncesi Penetrasyon		RTFOT Sonrası Penetrasyon		RTFOT Öncesi Yumuşama Noktası		RTFOT Sonrası Yumuşama Noktası		RTFOT Kütle Kaybı		Elastik Geri Dönme		Marshall Stabilite		SENB 0°C Sıcaklık		SENB -20°C Sıcaklık		SCB 0°C Sıcaklık		SCB -20°C Sıcaklık	
1	39,04	0,061	34,33	0,061	-33,31	0,062	-34,49	0,063	-34,93	0,056	16,90	0,058	59,56	0,062	28,98	0,064	28,07	0,061	27,28	0,064	25,85	0,059
2	39,45	0,061	34,64	0,062	-33,12	0,063	-34,40	0,063	-35,04	0,056	18,06	0,062	59,50	0,062	28,94	0,064	27,07	0,059	28,28	0,067	26,69	0,061
3	40,66	0,063	35,25	0,063	-33,04	0,063	-34,33	0,063	-34,98	0,056	14,81	0,051	59,97	0,062	29,52	0,066	28,23	0,062	27,66	0,065	26,86	0,061
4	42,19	0,066	37,21	0,066	-32,89	0,063	-34,36	0,063	-35,19	0,056	13,98	0,048	59,19	0,062	27,27	0,061	28,86	0,063	27,55	0,065	26,40	0,060
5	37,96	0,059	33,25	0,059	-33,70	0,062	-34,81	0,062	-29,15	0,068	18,59	0,064	60,59	0,063	28,64	0,064	28,10	0,061	27,27	0,064	27,69	0,063
6	39,95	0,062	35,85	0,064	-33,52	0,062	-34,76	0,062	-29,21	0,067	21,94	0,075	60,11	0,062	27,98	0,062	28,21	0,062	27,57	0,065	27,95	0,063
7	41,06	0,064	36,59	0,065	-33,42	0,062	-34,61	0,062	-29,15	0,068	18,06	0,062	60,24	0,063	28,86	0,064	28,85	0,063	27,97	0,066	29,25	0,066
8	42,93	0,067	37,59	0,067	-32,85	0,063	-34,29	0,063	-29,24	0,067	14,81	0,051	59,85	0,062	28,41	0,063	29,11	0,064	28,09	0,066	28,62	0,065
9	39,32	0,061	33,99	0,061	-33,61	0,062	-34,90	0,062	-28,63	0,069	19,55	0,067	61,42	0,064	26,98	0,060	28,43	0,062	25,19	0,059	26,26	0,060
10	40,59	0,063	34,96	0,062	-33,53	0,062	-34,81	0,062	-31,69	0,062	20,83	0,072	61,24	0,064	26,98	0,060	28,43	0,062	26,40	0,062	28,64	0,065
11	41,08	0,064	34,89	0,062	-33,27	0,063	-34,53	0,063	-30,83	0,064	20,00	0,069	60,19	0,063	27,82	0,062	28,17	0,062	27,03	0,064	28,25	0,064
12	41,78	0,065	36,36	0,065	-32,92	0,063	-34,35	0,063	-32,02	0,062	13,98	0,048	60,01	0,062	27,92	0,062	28,85	0,063	25,45	0,060	27,31	0,062
13	38,05	0,059	32,93	0,059	-33,67	0,062	-34,90	0,062	-30,63	0,064	21,58	0,074	60,53	0,063	27,69	0,062	29,19	0,064	25,61	0,060	28,04	0,064
14	39,64	0,062	34,90	0,062	-33,33	0,062	-34,50	0,063	-31,94	0,062	20,42	0,070	60,61	0,063	28,73	0,064	29,24	0,064	24,57	0,058	27,65	0,063
15	38,48	0,060	33,71	0,060	-33,39	0,062	-34,62	0,062	-30,91	0,064	21,21	0,073	59,66	0,062	27,88	0,062	28,91	0,063	24,48	0,058	27,02	0,061
16	40,81	0,063	35,27	0,063	-33,11	0,063	-34,27	0,063	-33,42	0,059	16,26	0,056	59,61	0,062	27,56	0,061	29,92	0,065	24,79	0,058	27,77	0,063
Deney Planı							1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
MRPI Değerleri							9,783	10,107	10,178	10,175	10,038	11,007	11,139	11,009	9,929	10,802	10,704	10,039	10,274	10,510	9,982	10,037

MRPI değerleri hesap edildikten sonra optimum seviyenin belirlenmesi için MRPI değerlerine taguchi yöntemi uygulanarak ortalama S/N etkileri belirlenmiştir. MRPI değerlerinin ortalama S/N etkileri Tablo 59’da verilmiştir.

Tablo 59. MRPI Ortalama S/N Etkileri

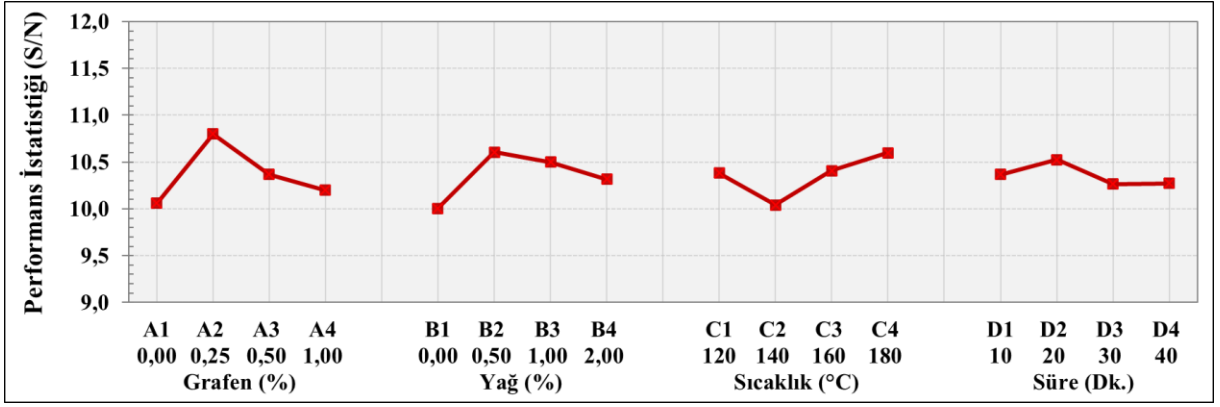
Ortalama S/N Etkileri				
	Grafen	Yağ	Sıcaklık	Süre
1. Seviye	10,06	10,01	10,38	10,37
2. Seviye	10,80	10,61	10,04	10,52
3. Seviye	10,37	10,50	10,41	10,26
4. Seviye	10,20	10,31	10,60	10,27

Ortalama S/N etkileri belirlendikten sonra MRPI performans tahminleri yapılmıştır. Performans tahminleri Tablo 60’ta verilmiştir. Parametrelerin S/N’e katkıları incelendiğinde MRPI sonuçlarına en yüksek etkiye sahip parametrelerin sırasıyla grafen, kenevir tohumu yağı, sıcaklık ve süre olduğu bulunmuştur.

Tablo 60. MRPI İçin Performans Tahminleri

Parametreler	Seviyeler	S/N üzerine etki
Grafen	A2	0,441
Yağ	B2	0,250
Sıcaklık	C4	0,240
Süre	D2	0,166
Tüm Faktörlerin Katkısı (S/N)		1,098
Ortalama Performans İstatistiği (S/N)		10,357

MRPI için optimum seviyeler A2 (Grafen %0,25), B2 (Kenevir yağı %0,5), C4 (180 °C) ve D2 (20 dk.) olarak bulunmuştur. Yapılan tüm deneyler bir arada değerlendirildiğinde “A2, B2, C4, D2” parametre seviyelerine göre hazırlanacak karışımın Taguchi methodu ile yapılan tahminlerine göre beklenen değerler verilmiştir.



Şekil 53. MRPI performans istatistiği

Şekil 53'te MRPI değerlerine göre ortalama performans istatistikleri grafik olarak verilmiştir. Grafen katkısının kullanılması MRPI değerini artırmıştır en büyük artış %0,25 oranında kullanılması ile yaşanmıştır. Yağ katkısı eklenmesi MRPI değerini artırmış en çok artış %0,5 oranında, en az artış ise %2 oranında eklenmesi ile gerçekleşmiştir. Sıcaklık artışı RTFOT sonrası penetrasyon ve -20°C SENB deneylerindeki davranış ile aynı davranışı göstermiştir. 2.seviyede bir miktar MRPI değerini düşürmüş 4.seviyede ise bir miktar artırmıştır. Süre seviyeleri arasında çok fazla fark olmasa da 2.seviye MRPI değerini bir miktar artırmıştır.

Tablo 61. MRPI ANOVA Tablosu

Parametreler	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Varyans	F-Değeri	Net Toplam	Katkı	P-Değeri
Grafen	3	1,228	0,409	66,833	1,210	42,43%	0,0030
Yağ	3	0,832	0,277	45,286	0,814	28,75%	0,0054
Sıcaklık	3	0,642	0,214	34,917	0,623	22,17%	0,0078
Süre	3	0,174	0,058	9,469	0,156	6,01%	0,0487
Hata	3	0,018	0,006			0,63%	
Toplam	15	2,895				100%	

MRPI değerlerinin istatistiksel açıdan anlamlılığın belirlenmesi amacıyla ANOVA analizi yapılarak Tablo 61'de verilmiştir. Tüm parametrelerin P değerlerinin 0,05'ten küçük ve F değerlerinin 9,277'den büyük olması istatistiksel olarak deneylerin geçerli olduğunu göstermektedir. ANOVA tablosuna göre deney sonuçlarına en fazla katkıyı %42,43 oranıyla grafen vermiştir. Sonrasında ise %28,75 oranı ile kenevir tohumu yağı ve %22,17 oranı ile sıcaklık vermiştir. En az katkıyı ise %6,01 oranı ile süre vermiştir. Tablo 62.'de MRPI doğrulama deney sonuçları verilmiştir. Doğrulama sonuçları %95 güven aralığında çıkmıştır.

Tablo 62. MRPI Doğrulama Deney Sonuçları

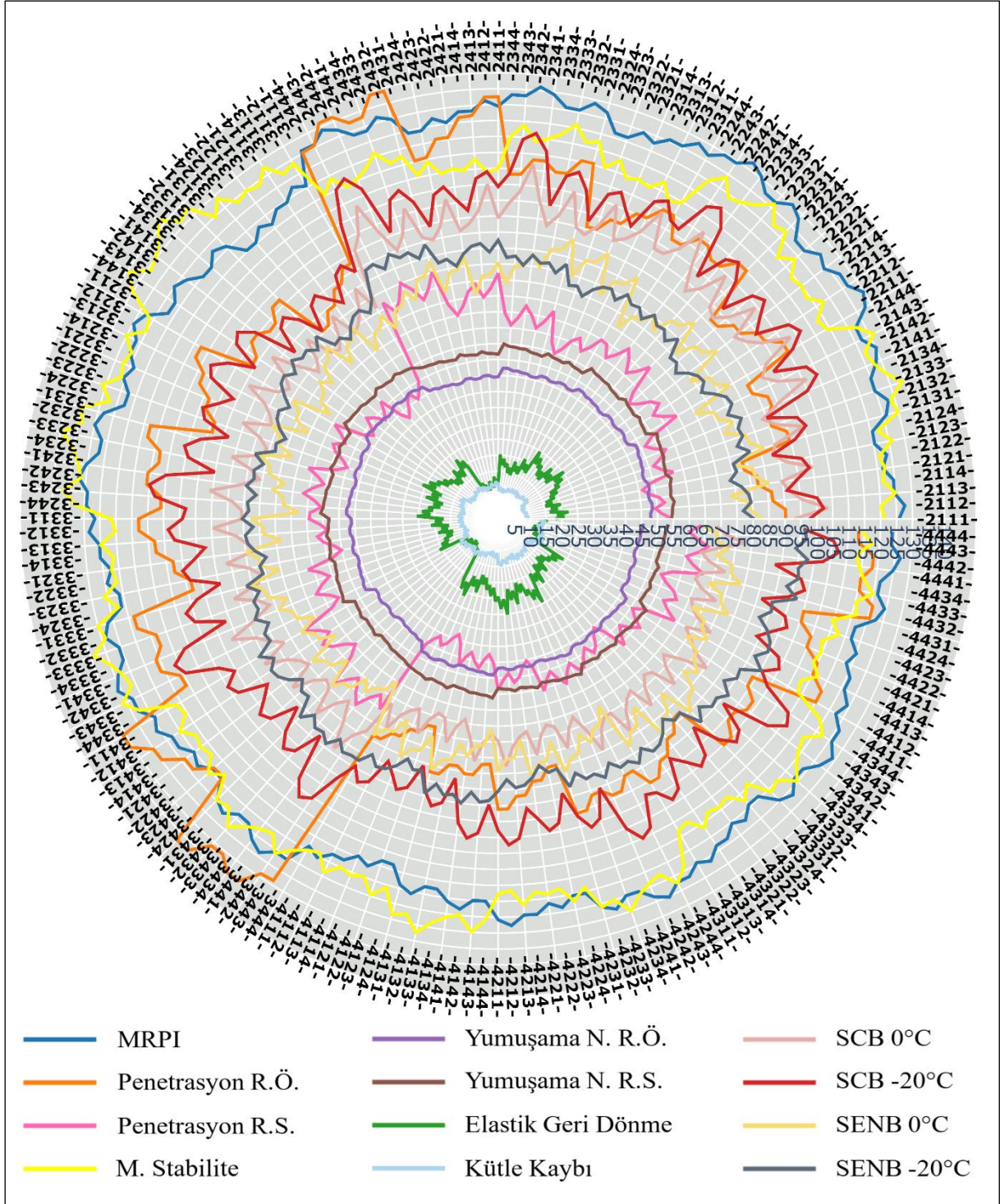
	MRPI Optimum Beklenen Değer		Doğrulama Deney Sonucu		S/N Güven Aralığı ($\alpha=95\%$)
Penetrasyon (RTFOT Öncesi)	40,67	108	40,33	103,9	40,29
	S/N	0.1 mm	S/N	0.1 mm	41,06
Penetrasyon (RTFOT Sonrası)	36,02	63,21	36,16	64,3	35,8
	S/N	0.1 mm	S/N	0.1 mm	36,23
Yumuşama Noktası (RTFOT Öncesi)	-33,48	47,19	-33,55	47,6	-33,59
	S/N	°C	S/N	°C	-33,36
Yumuşama Noktası (RTFOT Sonrası)	-34,76	54,72	-34,87	55,4	-34,87
	S/N	°C	S/N	°C	-34,65
Marshall Stabilite	60,45	1053	60,19	1022	60,17
	S/N	kg-kuvvet	S/N	kg-kuvvet	60,74
SENB 0	28,14	25,54	28,66	27,1	27,57
	S/N	Mpa√m	S/N	Mpa√m	28,71
SENB -20	28,21	25,74	28,37	26,2	28,04
	S/N	Mpa√m	S/N	Mpa√m	28,38
SCB 0	28,84	27,68	28,72	27,3	28,72
	S/N	Mpa√m	S/N	Mpa√m	28,97
SCB -20	29,54	30	29,43	29,6	29,39
	S/N	Mpa√m	S/N	Mpa√m	29,7

Çalışmada 4 parametre ve 4 seviye kullanılmıştır. Bu parametre ve seviyelerinin toplamda 256 farklı kombinasyonu vardır. Taguchi yöntemi ile her deney için bu 256 kombinasyonun tahminleri %95 güven aralığında yapılmıştır. MRPI, RTFOT öncesi-sonrası penetrasyon, RTFOT öncesi-sonrası yumuşama noktası, RTFOT kütle kaybı, elastik geri dönme, Marshall stabilite, 0°C SCB, -20°C SCB, 0°C SENB ve -20°C SENB deneyleri için toplamda 3072 (12*256) tahmin yapılmıştır.

Tablo 63. Radar Grafik İçin Dönüşüm Tablosu

Tahmin Türü	Yapılan işlem	Gösterim
MRPI	*12	
RTFOT Öncesi Penetrasyon	*1	
RTFOT Sonrası Penetrasyon	*1	
RTFOT Öncesi Yumuşama Noktası	*1	
RTFOT Sonrası Yumuşama Noktası	*1	
RTFOT Kütle Kaybı	/3	ONBİNDE
Elastik Geri Dönme	*2	
Marshall Stabilite	0.00980665*12	KN*12
SCB 0°C	*4	
SCB -20°C	*4	
SENB 0°C	*3	
SENB -20°C	*3	

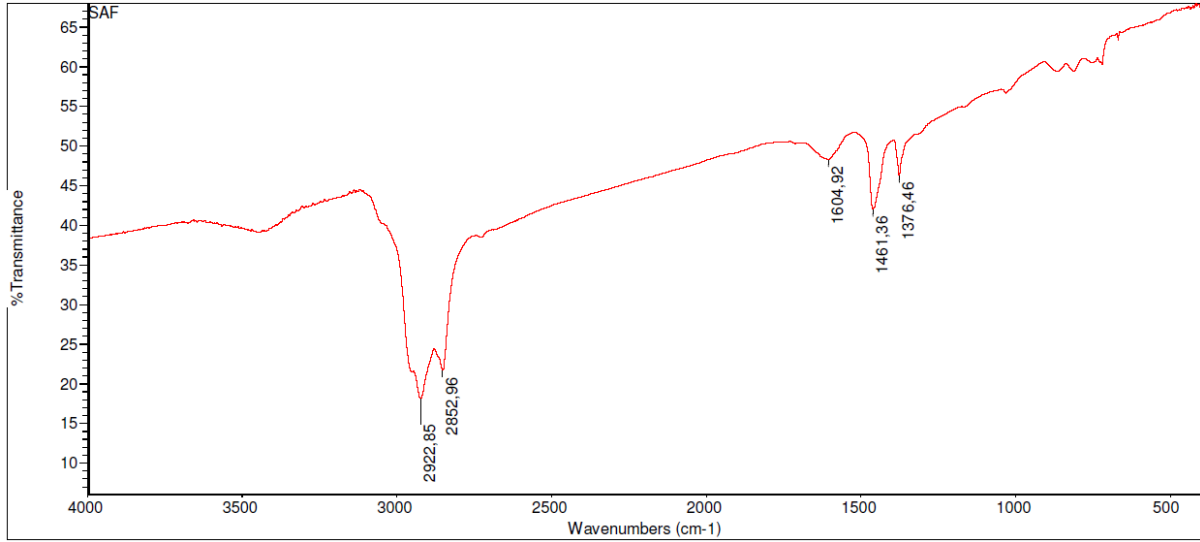
Şekil 54'te Yapılan tahminler radar grafiği ile gösterilmiştir. Parametrelerin tüm seviyelerde tahmin sonuçları radar grafiği kullanılarak görülebilmektedir. Yapılan tahminlerin tek bir radar grafiğinde görüntülenebilmesi için bazı deney tahminlerinde dönüşümler yapılmıştır. Dönüşüm tablosu Tablo 63'te verilmiştir.



Şekil 54. Deney tahmin grafiği

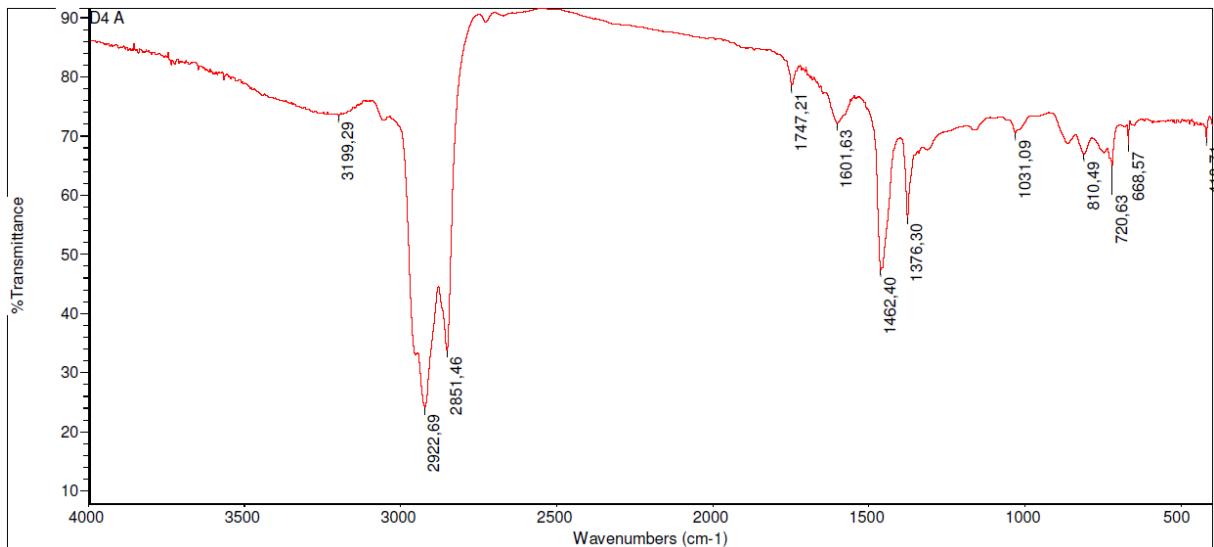
FTIR Analiz Sonuçları

FTIR analizi uygulanması için grafen nanoplatelet ve kenendir tohumu yağı oranlarının hem en düşük hem en yüksek seviyelerinin olduğu karışımlar belirlenmiştir. Saf bitüm ile deney planında bulunan 4 (A1, B4, C4, D4), 6 (A2, B2, C1, D4), 13 (A4, B1, C4, D2) ve 16 (A4, B4, C1, D3) numaralı karışımlardan örnekler alınarak FTIR analizleri yapılmıştır. Bitüm ve modifiye bitümde fonksiyonel grupları belirlemek için 500 ila 4000 cm^{-1} dalga boylarını içeren FTIR spektrumları alınmıştır.



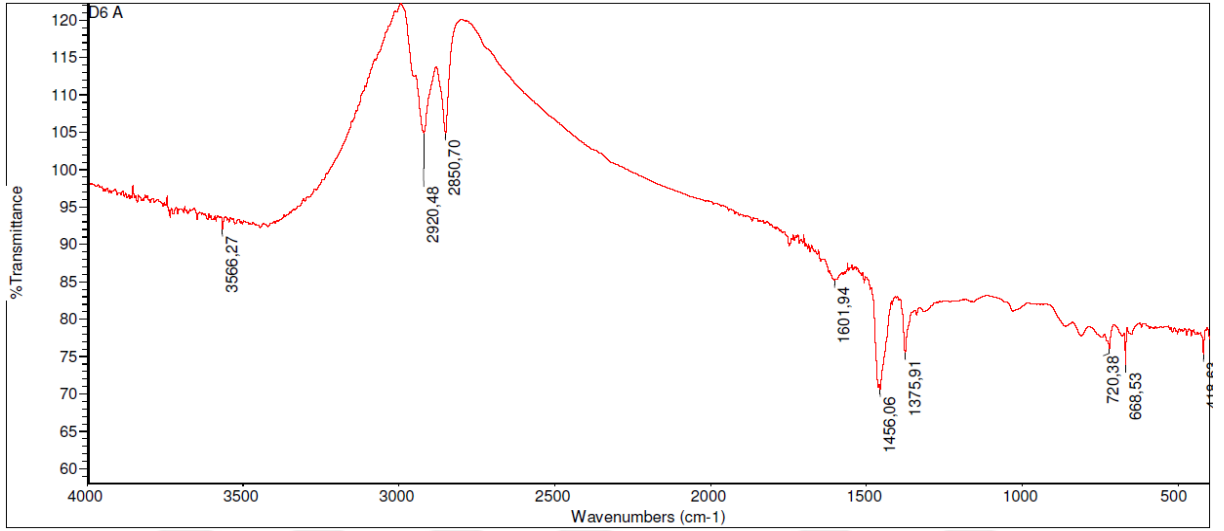
Şekil 55. Saf bitüm FTIR spektrumu

Saf bitümde 1376,46 ve 1461,36 cm^{-1} pikleri C-H eğilme titreşimlerini göstermektedir. 1604,92 cm^{-1} pikleri C-C titreşimlerine denk gelerek aromatik yapıların olduğunu göstermektedir. 2852,96 ve 2922,85 cm^{-1} pikleri C-H gerilme titreşimlerini göstermektedir.



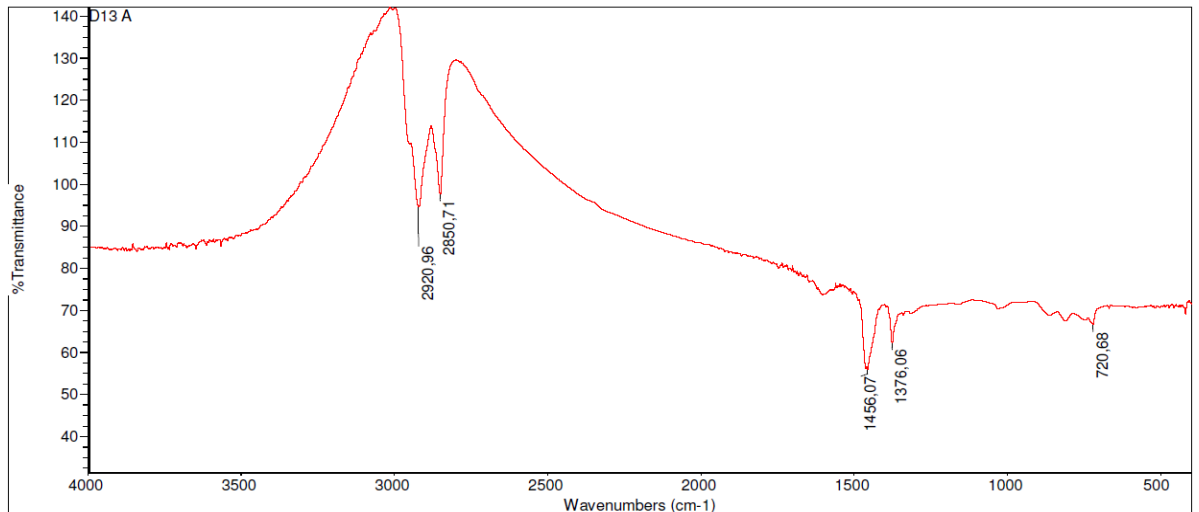
Şekil 56. 4 numaralı modifiye bitümün FTIR spektrumu

4 numaralı karışımda $720,63 \text{ cm}^{-1}$ piki saf bitümde bulunmayan bir piktir ve CH_2 eğilme titreşimini göstermektedir. $3199,29 \text{ cm}^{-1}$ piki O-H gerilme titreşimini göstermektedir. $1747,21 \text{ cm}^{-1}$ piki C=O gerilme titreşimini göstermektedir. $1031,09 \text{ cm}^{-1}$ piki S-O titreşimini göstermektedir Bu kimyasal bağ, bitümün yaşlanması sırasında kükürt elementleri tarafından oksijenin emilmesiyle üretilmektedir (Qian *et al.* 2022). Yüksek sıcaklıklarda asfalttaki kimyasal bağların koparak oluşturduğu radikaller; oksijenle reaksiyona girerek karbonil ve sülfoksit gruplarını meydana getirirler (Apeageyi, 2011). Saf bitüme kıyasla 4 numaralı karışımda oluşan yeni pikler kimyasal değişim olduğunu göstermektedir.



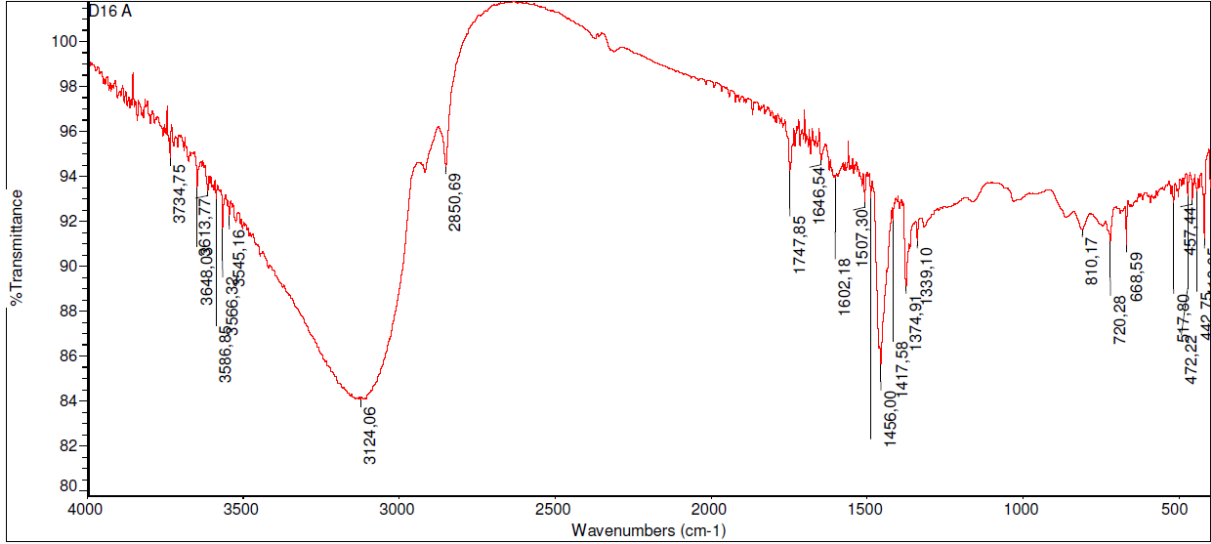
Şekil 57. 6 numaralı modifiye bitümün FTIR spektrumu

6 numaralı karışımda $3566,27 \text{ cm}^{-1}$ piki O-H gerilme titreşimini göstermektedir. Saf bitümle benzer olarak $1375,91$ ve $1456,06 \text{ cm}^{-1}$ pikleri C-H eğilme titreşimlerini göstermektedir. $1601,94 \text{ cm}^{-1}$ pikleri C-C titreşimlerine denk gelecek aromatik yapıların olduğunu göstermektedir. $2850,70$ ve $2920,48 \text{ cm}^{-1}$ pikleri C-H gerilme titreşimlerini göstermektedir.



Şekil 58. 13 numaralı modifiye bitümün FTIR spektrumu

13 numaralı karışımda $720,68 \text{ cm}^{-1}$ piki saf bitümde bulunmayan bir değerdir ve CH_2 eğilme titreşimini göstermektedir. Saf bitümle benzer olarak $1376,06$ ve $1456,07 \text{ cm}^{-1}$ pikleri C-H eğilme titreşimlerini, $2850,71$ ve $2920,96 \text{ cm}^{-1}$ pikleri C-H gerilme titreşimlerini göstermektedir. Saf bitümde bulunan 1600 cm^{-1} pikleri C-C titreşimlerine denk gelen pik 13 numaralı karışımda gözlemlenmemiştir.

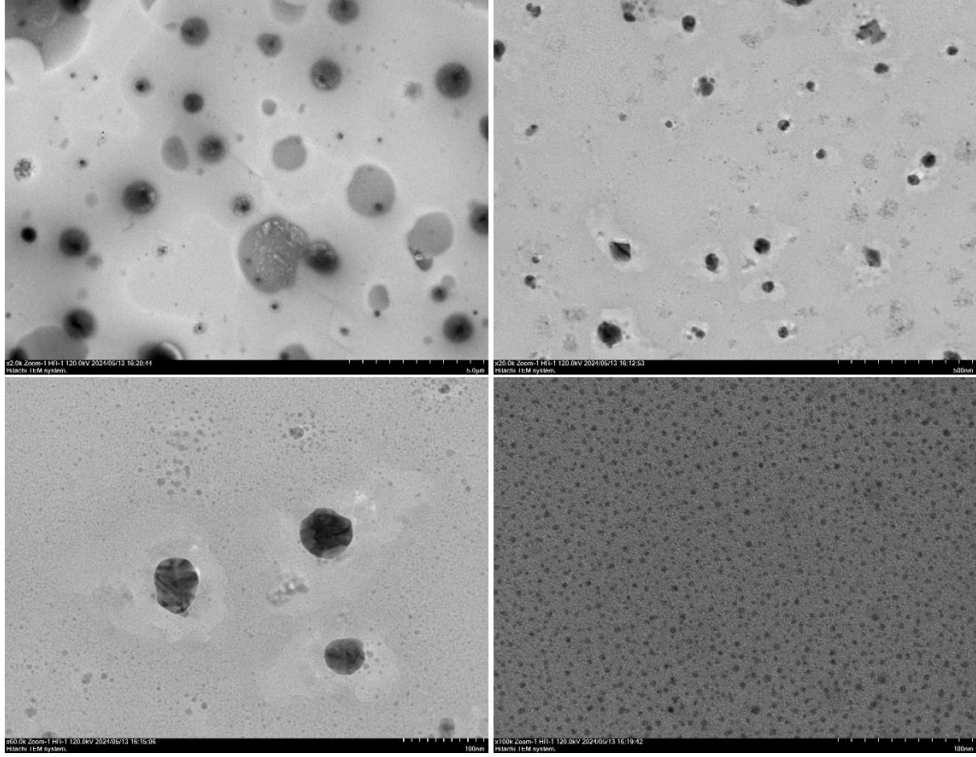


Şekil 59. 16 numaralı modifiye bitümün FTIR spektrumu

16 numaralı karışımda 3586 , 3613 , 3648 ve 3734 , 3545 ve 3124 cm^{-1} piki O-H gerilme titreşimlerini göstermektedir. Bu titreşimler saf bitümde bulunmamaktadır. $1602,18 \text{ cm}^{-1}$ piki ve yakınında oluşan pikler C-C alkinleri göstermektedir. Saf bitüme kıyasla C-C içeriğinde büyük değişiklikler gözlemlenmiştir. Bu büyük değişiklikler polimer zincirinin bozulduğu ve bu sebepten dolayı bitümün mekanik dayanımının azaldığını göstermektedir (Wu *et al.* 2022).

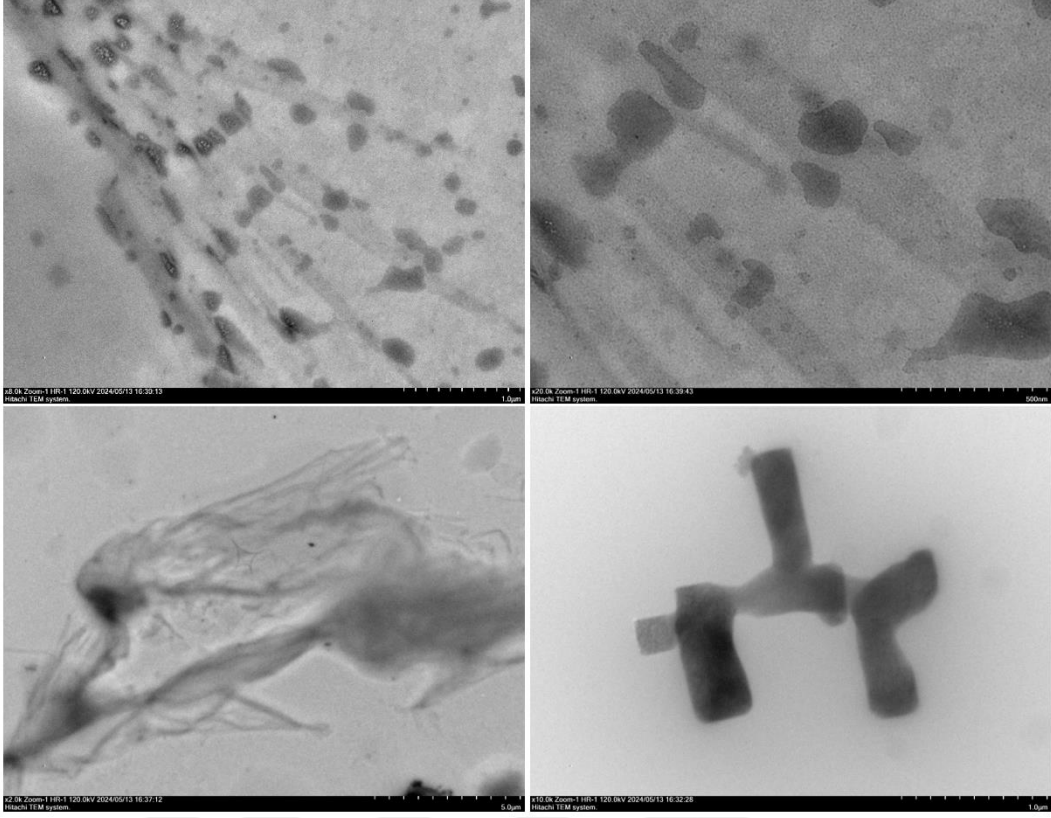
Geçirimli Elektron Mikroskobu (TEM) Görüntüleri

TEM görüntüleri kenevir tohumu yağının %2, grafen nanoplateletin %0 oranında kullanıldığı 4 numaralı karışımdan ve grafen nanoplateletin %1, kenevir tohumu yağının %0 oranında kullanıldığı 13 numaralı karışımdan alınmıştır.



Şekil 60. 4 numaralı karışımın TEM görüntüleri

Şekil 60'da verilen 4 numaralı karışım numunesinin TEM görüntülerinde partiküllerin homojen bir şekilde dağılmadığı ve düzensiz yapılar oluşturduğu gözlemlenmiştir. Bu, Şekil 56'da verilen FTIR spektrumunda gözlemlenen oksijen içeren fonksiyonel grupların (C=O, O-H) varlığıyla ilişkili olabileceği düşünülmektedir. Bu gruplar, partiküllerin yüzeyinde kimyasal etkileşimlere neden olarak aglomerasyon (birikim) yapabilir. Ayrıca FTIR spektrumunda alifatik ve aromatik hidrokarbonların yanı sıra oksijen içeren fonksiyonel grupların varlığı, bitümün kimyasal olarak değiştiğini göstermektedir. Bu fonksiyonel gruplar, TEM'de gözlemlenen düzensiz partikül yapılarının kimyasal etkileşimler sonucu oluştuğunu gösterdiği düşünülmektedir.



Şekil 61. 13 numaralı karışımın TEM görüntüleri

Şekil 61’de verilen 13 numaralı karışım numunesini büyük ve düzensiz yapılar, homojen olmayan dağılım ve belirgin bölgesel yoğunluklar göstermektedir. Bu yapı, grafen tabakalarının bitüm içinde daha çok fiziksel olarak karıştığını, kimyasal bağlanmanın sınırlı olduğunu gösterebilir.

SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında grafen nanoplatelet, kenevir tohumu yağı, sıcaklık, süre parametreleri ile parametrelere ait 4 seviye kullanılarak, parametrelerin optimum seviye kombinasyonlarının belirlenmesi amacıyla Taguchi optimizasyon yöntemi kullanılmıştır. Bu sayede parametre seviyelerine ait tüm kombinasyonlar (256 tane) içerisinde optimum parametre seviyeleri 16 karışım ile belirlenmiştir. Taguchi yöntemi kullanılmaması halinde optimum parametre seviyesini belirlemek için 256 karışım yapılması gerekirdi. Elastik geri dönme, Marshall stabilite, 0°C SCB, -20°C SCB, 0°C SENB ve -20°C SENB deneylerinde ve MRPI’de; optimum seviyelerin deney sonucunun maksimum değeri için en büyük-en iyi performans istatistiği kullanılmıştır. RTFOT kütle kaybı deneyinde optimum deney sonucunun minimum olması için en küçük-en iyi performans istatistiği kullanılmıştır. RTFOT öncesi-sonrası penetrasyon ve yumuşama noktası deneyleri için ise hem en büyük-en iyi hem de en küçük-en iyi performans istatistiği kullanılmıştır.

RTFOT öncesi penetrasyon değerinin maksimum olması istenen durum için optimum parametre seviyeleri “A3, B4, C3, D1” olarak bulunmuştur. RTFOT öncesi penetrasyon deneylerinde en fazla katkıyı %71,26 oranıyla yağ, ve ardından %15,66 oranıyla grafen sağlamaktadır. Kenevir tohumu yağı kullanım oranı arttıkça penetrasyon değerleri de artmıştır. Grafen nanoplatelet kullanımında ise %0,25 ve %0,5 oranlarında penetrasyon değerleri bir miktar artış göstermişken %1 oranında kullanımında penetrasyon değerinin düşmesini sağlamıştır. Sıcaklığın ve sürenin penetrasyon değerine etkisi az olmakla birlikte süre artışı ve sıcaklığın 2.seviyesi penetrasyon değerini azaltmıştır. Saf bitümün RTFOT öncesi penetrasyon değeri 90,8 iken deneye tabi tutulan 16 karışımın penetrasyon değerlerinin ortalamaları 79,03 ile 140,07 arasında değişmiştir. “A3, B4, C3, D1” parametre seviyelerini içeren optimum penetrasyon değeri ise saf bitüme kıyasla %55,63 oranında artarak 141,30 olarak bulunmuştur. RTFOT öncesi penetrasyon değerinin minimum olması istenen durum için optimum parametre seviyeleri “A4, B1, C2, D4” olarak bulunmuştur. Optimum parametre seviyelerine göre yapılan deney sonucunda saf bitüme kıyasla %33,01 oranında azalış göstererek 65,80 olarak bulunmuştur.

RTFOT sonrası penetrasyon değerinin maksimum olması istenen durum için optimum parametre seviyeleri “A2, B4, C3, D1” olarak bulunmuştur. RTFOT sonrası penetrasyon deneylerinde en fazla katkıyı %65,25 oranıyla yağ, ve ardından %20,41 oranıyla grafen

sağlamaktadır. Kenevir tohumu yağı kullanım oranı arttıkça penetrasyon değerleri de artmıştır. Özellikle %2 kenevir yağı kullanımında penetrasyon değerinde çok fazla artış gerçekleşmiştir. Grafen nanoplatelet katkısının %0,25 oranında kullanımı penetrasyon değerini bir miktar artırmış, %0,50 ve %1 oranında kullanımlarında ise penetrasyon değerini azaltmıştır. Sıcaklığın ve sürenin penetrasyon değerine etkisi az olmakla birlikte süre artışı ve sıcaklığın 2.seviyesi penetrasyon değerini azaltmıştır. Saf bitümün RTFOT sonrası penetrasyon değeri 50,5 iken deneye tabi tutulan 16 karışımın penetrasyon değerlerinin ortalamaları 44,30 ile 75,77 arasında değişmiştir. “A2, B4, C3, D1” parametre seviyelerini içeren optimum penetrasyon değeri ise saf bitüme kıyasla %60,79 oranında artarak 81,20 olarak bulunmuştur. RTFOT sonrası penetrasyon değerinin minimum olması istenen durum için optimum parametre seviyeleri “A4, B1, C2, D3” olarak bulunmuştur. Optimum parametre seviyelerine göre yapılan deney sonucunda saf bitüme kıyasla %23,33 oranında azalış göstererek 38,72 olarak bulunmuştur.

RTFOT öncesi yumuşama noktası değerinin minimum olması istenen durum için optimum parametre seviyeleri “A1, B4, C3, D2” olarak bulunmuştur. RTFOT öncesi yumuşama noktası deneylerinde en fazla katkıyı %71,34 oranıyla yağ, ardından %18,88 oranıyla grafen nanoplatelet sağlamaktadır. Kenevir tohumu yağı kullanım oranı arttıkça yumuşama noktası değerleri de azalmıştır. Grafen nanoplatelet kullanımı yumuşama noktası değerlerini artırmıştır. Sıcaklık 3.seviyeye kadar yumuşama noktasını azaltırken 4.seviyede çok az bir miktar artışa neden olmuştur. Süre 1. ve 2. seviyede hemen hemen aynı etkiyi gösterirken 3. ve 4. seviyelerde yumuşama noktasını artırmıştır. Saf bitümün RTFOT öncesi yumuşama noktası değeri 45,50°C iken deneye tabi tutulan 16 karışımın yumuşama noktası değerlerinin ortalamaları 43,90 ile 48,40°C arasında değişmiştir. “A1, B4, C3, D2” parametre seviyelerini içeren optimum yumuşama noktası değeri ise saf bitüme kıyasla %6,92 oranında azalarak 42,35°C olarak bulunmuştur. RTFOT öncesi yumuşama noktası değerinin maksimum olması istenen durum için optimum parametre seviyeleri “A4, B1, C4, D4” olarak bulunmuştur. Optimum parametre seviyelerine göre yapılan deney sonucunda saf bitüme kıyasla %7,91 oranında artış göstererek 49,10°C olarak bulunmuştur.

RTFOT sonrası yumuşama noktası değerinin minimum olması istenen durum için optimum parametre seviyeleri “A1, B4, C3, D1” olarak bulunmuştur. RTFOT sonrası yumuşama noktası deneylerinde en fazla katkıyı %59,71 oranıyla yağ, ardından %21,36 oranıyla grafen nanoplatelet sağlamaktadır. Kenevir tohumu yağı kullanım oranı arttıkça yumuşama noktası değerleri de azalmıştır. Grafen nanoplatelet kullanımı yumuşama noktası değerlerini artırmıştır. Sıcaklık ilk üç seviyede benzer davranış gösterirken 4.seviyede çok az bir miktar artışa neden olmuştur. Sürenin artışı yumuşama noktası değerlerini artırmıştır. Saf

bitümün RTFOT sonrası yumuşama noktası değeri 53,00°C iken deneye tabi tutulan 16 karışımın yumuşama noktası değerlerinin ortalamaları 51,70 ile 55,60°C arasında değişmiştir. “A1, B4, C3, D1” parametre seviyelerini içeren optimum yumuşama noktası değeri ise saf bitüme kıyasla %4,43 oranında azalarak 50,65°C olarak bulunmuştur. RTFOT sonrası yumuşama noktası değerinin maksimum olması istenen durum için optimum parametre seviyeleri “A3, B1, C4, D4” olarak bulunmuştur. Optimum parametre seviyelerine göre yapılan deney sonucunda saf bitüme kıyasla %6,04 oranında artış göstererek 56,20°C olarak bulunmuştur.

Saf bitüme göre modifiye edilmiş bitümlerin tamamının penetrasyon indekslerinde artış meydana gelmiştir. Özellikle grafen katkısının %0,25 ve %0,5 olduğu karışımlarda penetrasyon indeksi RTFOT öncesinde ve sonrasında daha fazla artış göstermiştir. Penetrasyon indeksinin artışı; modifiye edilmiş bitümlerin ısıya karşı hassasiyetinin azaldığını ve buna bağlı olarak düşük sıcaklık çatlakları ile yüksek sıcaklık deformasyonlarına karşı daha dirençli hale geldiğini göstermektedir.

RTFOT kütle kaybı değerinin minimum olması istenen durum için optimum parametre seviyeleri “A2, B1, C3, D4” olarak bulunmuştur. RTFOT kütle kaybı deneylerinde en fazla katkıyı %86,09 oranıyla grafen nanoplatelet sağlamaktadır. Grafen katkısının kullanılması kütle kaybı değerini azaltmıştır ve en çok azalış %0,25 katkı oranında meydana gelmiştir. Yağ katkısı eklenmesi kütle kaybını sürekli artırmıştır. Sıcaklık her seviyede kütle kaybını azaltmıştır. Süre ise her seviyede benzer etkiler göstermiştir. RTFOT kütle kaybı deneyine tabi tutulan 16 karışımın kütle kaybı değerlerinin ortalamaları ‰ 27,02 ile 57,48 arasında değişmiştir. “A2, B1, C3, D4” parametre seviyelerini içeren optimum kütle kaybı değeri ise ‰23,65 olarak bulunmuştur.

Elastik geri dönme değerinin maksimum olması istenen durum için optimum parametre seviyeleri “A4, B2, C1, D4” olarak bulunmuştur. Elastik geri dönme deneylerinde en fazla katkıyı %59,95 oranıyla kenevir tohumu yağı, ardından %27,93 oranıyla grafen nanoplatelet sağlamaktadır. Grafen katkısının kullanılması elastik geri dönme değerini artırmıştır en büyük artış %1 oranında kullanılması ile yaşanmıştır. Yağ katkısı eklenmesi elastik geri dönme değerini %0,5 oranında küçük bir miktar artırmış, %1 ve %2 oranında ise azaltmıştır. Elastik geri dönme deneyine tabi tutulan 16 karışımın değerlerinin ortalamaları %5 ile 12,50 arasında değişmiştir. “A4, B2, C1, D4” parametre seviyelerini içeren optimum elastik geri dönme değeri ise %13,50 olarak bulunmuştur.

Marshall stabilite değerinin maksimum olması istenen durum için optimum parametre seviyeleri “A3, B1, C3, D3” olarak bulunmuştur. Marshall stabilite deneylerinde en fazla

katkısını %47,44 oranıyla grafen nanoplatelet, %30,55 oranıyla kenevir tohumu yağı ve %17,01 oranıyla sıcaklık sağlamaktadır. Kenevir tohumu yağı kullanım oranı arttıkça Marshall stabilite değerleri de artmıştır. Grafen nanoplatelet katkısının kullanılması stabilite değerini artırmıştır ve en büyük artış %0,5 oranında kullanılması ile yaşanmıştır. Yağ katkısı eklenmesi stabilite değerini azaltmıştır. Sıcaklık artışı stabilite değerini arttırsa da en büyük artış 3.seviyede olmuştur. Süre 3.seviyede stabilite değerini artırırken diğer seviyelerde benzer etkiler göstermiştir. Saf bitüm ile yapılan Marshall stabilite deneyinde stabilite değeri 974 kg-kuvvet iken 16 karışım ile yapılan deneylerde Marshall stabilite değerleri 911 kg-kuvvet ile 1178 kg-kuvvet arasında değişmiştir. “A3, B1, C3, D3” parametre seviyelerini içeren optimum Marshall stabilite değeri ise saf bitüm ile yapılabileceği kıyasla %21,21 oranında artarak 1180,5 kg-kuvvet olarak bulunmuştur.

0°C SCB deneyinde kırılma tokluğu değerinin maksimum olması istenen durum için optimum parametre seviyeleri “A2, B3, C4, D2” olarak bulunmuştur. 0°C SCB deneyinde en fazla katkıyı %85,49 oranıyla grafen nanoplatelet ve %9,86 oranıyla süre sağlamaktadır. Grafen katkısının kullanılması kırılma tokluğu değerini azaltmıştır ve özellikle en büyük azalış %1 oranında kullanılması ile gerçekleşmiştir. Yağ katkısı eklenmesi kırılma tokluğu değerini %2 oranına kadar artırmış, %2 oranında ise bir miktar azaltmıştır. Süre 2. ve 3.seviyede kırılma tokluğu değerini artırırken 1. ve 2.seviye benzer etki göstermiştir. 16 karışım ile yapılan 0°C SCB deneylerinde kırılma tokluğu değerleri 16,75 ile 25,93 $\text{Mpa}\sqrt{m}$ arasında değişmiştir. “A2, B3, C4, D2” parametre seviyelerini içeren optimum kırılma tokluğu değeri ise 28,24 $\text{Mpa}\sqrt{m}$ olarak bulunmuştur.

-20°C SCB deneyinde kırılma tokluğu değerinin maksimum olması istenen durum için optimum parametre seviyeleri “A2, B3, C4, D2” olarak bulunmuştur. -20°C SCB deneyinde en fazla katkıyı %55,82 oranıyla grafen nanoplatelet ve %16,68 oranıyla süre sağlamaktadır. Grafen nanoplatelet katkısının kullanılması -20°C sıcaklıkta kırılma tokluğu değerini artırmıştır, özellikle en büyük artış %0,25 oranında kullanılması ile yaşanmıştır. Yağ katkısı eklenmesi kırılma tokluğunu artırmıştır. Sıcaklık artışı ilk üç seviyede benzer etkiye sahipken son seviyede kırılma tokluğunun artmasını sağlamıştır. Süre 2. ve 3.seviyede kırılma tokluğunu artırırken 4.seviyede azaltmıştır. 16 karışım ile yapılan -20°C SCB deneylerinde kırılma tokluğu değerleri 25,85 ile 29,45 $\text{Mpa}\sqrt{m}$ arasında değişmiştir. “A2, B3, C4, D2” parametre seviyelerini içeren optimum kırılma tokluğu değeri ise 29,99 $\text{Mpa}\sqrt{m}$ olarak bulunmuştur.

0°C SENB deneyinde kırılma tokluğu değerinin maksimum olması istenen durum için optimum parametre seviyeleri “A1, B3, C3, D1” olarak bulunmuştur. 0°C SENB deneyinde en fazla katkıyı %43,50 oranıyla grafen nanoplatelet ve %28,33 oranıyla süre sağlamaktadır.

Grafen nanoplatelet katkısının kullanılması 0°C sıcaklıkta kırılma tokluğunu azaltmıştır. Kenevir tohumu yağı katkısının kullanılması kırılma tokluğu değerini ilk üç seviyede artırmış, 4.seviyede ise azaltmıştır. Sıcaklık artışı kırılma tokluğunu 2. ve 3.seviyede artırmış son seviyede ise azaltmıştır. Süre arttıkça kırılma tokluğu değeri azalmıştır. 16 karışım ile yapılan 0°C SENB deneylerinde kırılma tokluğu değerleri 22,34 ile 29,91 $\text{Mpa}\sqrt{m}$ arasında değişmiştir. “A1, B3, C3, D1” parametre seviyelerini içeren optimum kırılma tokluğu değeri ise 30,49 $\text{Mpa}\sqrt{m}$ olarak bulunmuştur.

-20°C SENB deneyinde kırılma tokluğu değerinin maksimum olması istenen durum için optimum parametre seviyeleri “A4, B4, C4, D1” olarak bulunmuştur. -20°C SENB deneyinde en fazla katkıyı %50,88 oranıyla grafen nanoplatelet ve %31,13 oranıyla süre sağlamaktadır. Grafen nanoplatelet katkısının kullanılması -20°C sıcaklıkta kırılma tokluğunu artırmıştır ve en büyük artış %1 oranında kullanılması ile yaşanmıştır. Yağ katkısı eklenmesi kırılma tokluğunu 4.seviyede önemli miktarda artırırken diğer seviyelerin etkileri birbirlerine yakın olmuştur. Süre artışı kırılma tokluğunu düşürürken sıcaklık ise 2. ve 3.seviyede artırmıştır. 16 karışım ile yapılan -20°C SENB deneylerinde kırılma tokluğu değerleri 22,56 ile 31,33 $\text{Mpa}\sqrt{m}$ arasında değişmiştir. “A4, B4, C4, D1” parametre seviyelerini içeren optimum kırılma tokluğu değeri ise 33,14 $\text{Mpa}\sqrt{m}$ olarak bulunmuştur.

Bitüm ve bitümlü karışımların incelenen özelliklerinin hepsinin bir arada değerlendirilmesi için yapılan MRPI optimizasyonun maksimum olması istenen durum için optimum parametre seviyeleri “A2, B2, C4, D2” olarak bulunmuştur. MRPI optimizasyonunda en fazla katkıyı %42,43 oranıyla grafen nanoplatelet ve %28,75 oranıyla kenevir tohumu yağı sağlamaktadır. Grafen nanoplatelet katkısının kullanılması MRPI değerini artırmıştır en büyük artış %0,25 oranında kullanılması ile gerçekleşmiştir. Kenevir tohumu yağı katkısı eklenmesi MRPI değerini artırmış en çok artış %0,5 oranında, en az artış ise %2 oranında eklenmesi ile gerçekleşmiştir. Sıcaklık 2.seviyede MRPI değerini düşürmüş, süre ise 2.seviyede MRPI değerini bir miktar artırmıştır. MRPI optimum parametre seviyelerine göre yapılan doğrulama deney sonuçlarında RTFOT öncesi penetrasyon %14,4, RTFOT sonrası penetrasyon %27,33, RTFOT öncesi yumuşama noktası %4,62, RTFOT sonrası yumuşama noktası %4,53, stabilite %4,83, -20°C SENB kırılma tokluğu %3,43, 0°C SCB kırılma tokluğu %18,03, -20°C SCB kırılma tokluğu %50,84 oranında artmıştır. 0°C SENB kırılma tokluğu değerinde önemli bir değişiklik olmamıştır. Optimum seviyeler kullanıldığı takdirde 1 ton bitümlü sıcak karışım elde etmek için 115,25 gram GNP ve 230,5 gram kenevir tohumu yağı gereklidir.

Bu çalışmada karıştırma sıcaklığı en yüksek 180°C olarak alınmıştır. Bundan sonraki çalışmalarda daha yüksek karıştırma sıcaklıkları kullanılabilir. Ayrıca sürdürülebilirlik

açısından değerlendirildiğinde bu çalışmaya ek olarak geri dönüştürülmüş bitüm veya agregaların kullanımı sağlanabilir. Bununla birlikte çalışmada kullanılan kenevir yağına alternatif olarak başka bitkisel tohum yağları da bitüm katkı malzemesi olarak kullanılabilir. Son olarak saha uygulaması yapılarak gerçek trafik yükleri ve çevre koşulları altında sonuçlar elde edilebilir ve bu sonuçlar laboratuvar ortamında üretilen numuneler ile kıyaslanabilir.



KAYNAKLAR

- 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.
- Al-Omari, A. A., Khedaywi, T. S. and Khasawneh, M. A. (2018). Laboratory characterization of asphalt binders modified with waste vegetable oil using SuperPave specifications. *International Journal of Pavement Research Technology*, 11(1), 68-76.
- Aliha, M. M., Behbahani, H., Fazaeli, H. and Rezaifar, M. (2014). Study of characteristic specification on mixed mode fracture toughness of asphalt mixtures. *Construction Building Materials*, 54, 623-635.
- Alyamaç, K. E. (2008). *Kendiliğinden Yerleşen Betonun Lineer Olmayan Kırılma Mekanik Prencipleriyle İncelenmesi*. (Doktora Tezi). Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- 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.
- Anonymous. (2012). Bitümlü Karışımlar Laboratuvarı Çalışmaları. *Karayolları Genel Müdürlüğü, Ankara*.
- Anonymous. (2013). Karayolları Teknik Şartnamesi. *Karayolları Genel Müdürlüğü, Ankara*.
- Anonymous. (2014). BS EN 12597 Bitumen and bituminous binders -Terminology.
- Anonymous. (2021). Bitümlü Bağlayıcılar Laboratuvar El Kitabı. *Karayolları Genel Müdürlüğü, Ankara*.
- Apegyei, 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.
- Artamendi, I. and Khalid, H. A. (2006). A comparison between beam and semi-circular bending fracture tests for asphalt. *Road Materials Pavement Design*, 7(sup1), 163-180.
- Asli, H., Ahmadinia, E., Zargar, M., Karim, M. R. J. C. and Materials, B. (2012). Investigation on physical properties of waste cooking oil–Rejuvenated bitumen binder. 37, 398-405.
- Baek, J. (2010). *Modeling reflective cracking development in hot-mix asphalt overlays and quantification of control techniques*: University of Illinois at Urbana-Champaign.
- 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.

- Behbahani, H., Mohammad Aliha, M. R., Fazaeli, H. and Aghajani, S. (2013). *Experimental fracture toughness study for some modified asphalt mixtures*. Paper presented at the Advanced Materials Research.
- Braham, A. F., Buttlar, W. G. and Marasteanu, M. O. (2007). Effect of binder type, aggregate, and mixture composition on fracture energy of hot-mix asphalt in cold climates. *Transportation research record*, 2001(1), 102-109.
- Brcic, H. (2016). *Investigation of the rheological properties of asphalt binder containing graphene nanoplatelets*. (Master Thesis). Norwegian University of Science and Technology, Norway.
- Bui, H. H. and Saleh, M. (2021). Effects of specimen size and loading conditions on the fracture behaviour of asphalt concretes in the SCB test. *Engineering Fracture Mechanics*, 242, 107452.
- Chen, Y., Wang, Q., Li, Z. and Ding, S. (2020). Rheological properties of graphene nanoplatelets/rubber crowd composite modified asphalt. *Construction and Building Materials*, 261, 120505.
- Cheng, I. F., Xie, Y., Gonzales, R. A., Brejna, P. R., Sundararajan, J. P., Kengne, B. F., Aston, D. E., McIlroy, D. N., Foutch, J. D. and Griffiths, P. R. (2011). Synthesis of graphene paper from pyrolyzed asphalt. *Carbon*, 49(8), 2852-2861.
- Choi, W., Lahiri, I., Seelaboyina, R. and Kang, Y. S. (2010). Synthesis of graphene and its applications: a review. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, 35(1), 52-71.
- Cooper III, S. B., Mohammad, L. N. and Elseifi, M. (2013). Evaluation of Asphalt Mixtures Containing Renewable Binder Technologies. *International Journal of Pavement Research Technology*, 6(5).
- Çeloğlu, M. E. (2020). *Farklı Biyokütlelerin Pirolizinden Elde Edilen Biyoçarların Bitüm ve Bitümlü Sıcak Karışımlarda Kullanılabilirliğinin Araştırılması*. (Doktora Tezi). Fırat Üniversitesi, Elazığ.
- 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.
- Falchetto, A. C., Moon, K. H., Wang, D., Riccardi, C. and Wistuba, M. P. (2018). Comparison of low-temperature fracture and strength properties of asphalt mixture obtained from IDT and SCB under different testing configurations. *Road Materials Pavement Design*, 19(3), 591-604.
- Firoozifar, S. H., Foroutan, S. and Foroutan, S. (2011). The effect of asphaltene on thermal properties of bitumen. *Chemical Engineering Research Design*, 89(10), 2044-2048.
- 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.
- 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., Haq, M. F. u., Jamal, Zaidi, S. B. A. and Nasir, M. A. (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.
- He, J., Hu, W., Xiao, R., Wang, Y., Polaczyk, P. and Huang, B. (2022). A review on Graphene/GNPs/GO modified asphalt. *Construction Building Materials*, 330, 127222.
- Hoare, T. R. and Hesp, S. A. (2000). Low-temperature fracture testing of asphalt binders: regular and modified systems. *Transportation research record*, 1728(1), 36-42.
- Huang, B., Shu, X. and Vukosavljevic, D. (2011). Laboratory investigation of cracking resistance of hot-mix asphalt field mixtures containing screened reclaimed asphalt pavement. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23(11), 1535-1543.
- 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.
- Joni, H. H., Al-Rubae, R. H. and Al-zerkani, M. A. (2020). *Characteristics of asphalt binder modified with waste vegetable oil and waste plastics*. Paper presented at the IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.
- Jyothirmai, B., Kiranmai, M. H. and Vagdevi, K. (2020). *Graphene reinforces asphalt—Doubles durability of road*. Paper presented at the International Conference on Multifunctional Materials, India.
- Keyf, S. (2010). Investigation of Penetration and Penetration Index in Bitumen Modified with SBS and Reactive Terpolymer. *Sigma*, 28(1), 26-34.
- Kök, B. V., Yılmaz, M. and Yılmaz, M. (2009). Sivas Divriği Çelik Cürufunun Bitümlü Sıcak Karışımlarda Kullanılabilirliği. *Cumhuriyet Üniversitesi Fen Fakültesi Fen Bilimleri Dergisi*, 30(1).
- Krishnaiah, K. and Shahabudeen, P. (2012). *Applied design of experiments and Taguchi methods*: PHI Learning Pvt. Ltd.
- Le, J., Marasteanu, M. and Turos, M. (2016). *Graphene nanoplatelet (GNP) reinforced asphalt mixtures: A novel multifunctional pavement material*. Retrieved from Minnesota:
- Li, R. (2018). *Novel Vegetable Oil-Based Epoxy Resin Systems: Synthesis, Properties and Potential Applications*: Washington State University.
- Li, X. and Marasteanu, M. (2010a). The fracture process zone in asphalt mixture at low temperature. *Engineering Fracture Mechanics*, 77(7), 1175-1190.
- Li, X. and Marasteanu, M. (2010b). Using semi circular bending test to evaluate low temperature fracture resistance for asphalt concrete. *Experimental mechanics*, 50(7), 867-876.
- Li, X., Wang, Y.-M., Wu, Y.-L., Wang, H.-R., Chen, M., Sun, H.-D., Fan, L. J. C. and Materials, B. (2021). Properties and modification mechanism of asphalt with graphene as modifier. 272, 121919.
- Lim, C.-T., Tan, S.-A. and Fwa, T.-F. (1995). Specimen Size Effects on The Diametrical Mechanical Testing of Cylindrical Asphalt Mixes. *Journal of Testing Evaluation*, 23(6), 436-441.

- Liu, Z., Tu, Z., Li, Y., Yang, F., Han, S., Yang, W., Zhang, L., Wang, G., Xu, C. and Gao, J. (2014). Synthesis of three-dimensional graphene from petroleum asphalt by chemical vapor deposition. *Materials Letters*, 122, 285-288.
- Lu, S.-N., Xie, N., Feng, L.-C. and Zhong, J. (2015). Applications of nanostructured carbon materials in constructions: The state of the art. *Journal of Nanomaterials*, 2015(1), 807416.
- Marasteanu, M., Zofka, A., Turos, M., Li, X., Velasquez, R., Li, X., Buttlar, W. G., Paulino, G. H., Braham, A. and Dave, E. (2007). *Investigation of Low Temperature Cracking in Asphalt Pavements-A Transportation Pooled Fund Study* (Vol. 43). Minnesota: Minnesota Department of Transportation.
- Marasteanu, M. O., Le, J.-L. and Turos, M. I. (2016). *Graphene nano-platelet (GNP) reinforced asphalt binders and mixtures*. Paper presented at the Proceedings of the 6th Eurasphalt & Eurobitume Congress, Prague, Czech Republic.
- Marasteanu, M. O., Li, X., Clyne, T. R., Voller, V., Timm, D. H. and Newcomb, D. (2004). *Low Temperature Cracking of Asphalt Concrete Pavement*: Minnesota Department of Transportation.
- Mola, E., Bayrak, O. Ü., Baş, F. İ. and Bayata, H. F. (2021). Investigating the usability of kevlar and steel fibers as a hybrid in concrete pavements. *Sigma Journal of Engineering Natural Sciences*, 42(2), 344-355.
- Moreno-Navarro, F., Sol-Sánchez, M., Gámiz, F. and Rubio-Gámez, M. (2018). Mechanical and thermal properties of graphene modified asphalt binders. *Construction Building Materials*, 180, 265-274.
- Moretti, L., Fabrizi, N., Fiore, N. and D'Andrea, A. (2021). Mechanical characteristics of graphene nanoplatelets-modified asphalt mixes: A comparison with polymer-and not-modified asphalt mixes. *Materials*, 14(9), 2434.
- Morova, N., Serin, S., Terzi, S., Saltan, M., Kucukcapraz, D. O., Karahançer, S. S. and Eriskin, E. (2016). Utility of Polyparaphenylene Terephthalamide Fiber in Hot Mix Asphalt as A Fiber. *Construction Building Materials*, 107, 87-94.
- 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.
- Ozer, H., Al-Qadi, I. L., Lambros, J., El-Khatib, A., Singhvi, P. and Doll, B. (2016). Development of the fracture-based flexibility index for asphalt concrete cracking potential using modified semi-circle bending test parameters. *Construction Building Materials*, 115, 390-401.
- Paliukaite, M., Vaitkus, A. and Zofka, A. (2014). *Evaluation of bitumen fractional composition depending on the crude oil type and production technology*. Paper presented at the Environmental engineering. Proceedings of the international conference on environmental engineering. ICEE.
- Panda, R. P., Das, S. S. and Sahoo, P. K. (2018). Estimating in situ optimum bitumen content of dense bituminous macadam: an alternative approach. *Journal of The Institution of Engineers India Series A*, 99, 653-659.
- 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.

- Potts, J. R., Dreyer, D. R., Bielawski, C. W. and Ruoff, R. S. (2011). Graphene-based polymer nanocomposites. *Polymer*, 52(1), 5-25.
- 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 Engineering*, 2022.
- Roy, R. K. (2010). *A primer on the Taguchi method*: Society of manufacturing engineers.
- Salama, H. K., Chatti, K. and Lyles, R. W. (2006). Effect of heavy multiple axle trucks on flexible pavement damage using in-service pavement performance data. *Journal of transportation engineering*, 132(10), 763-770.
- Sangiorgi, C., Eskandarsefat, S., Tataranni, P., Simone, A., Vignali, V., Lantieri, C. and Dondi, G. (2017). A complete laboratory assessment of crumb rubber porous asphalt. *Construction Building Materials*, 132, 500-507.
- Sayın, E. and Tanyıldızı, H. (2006). Bitümlü Sıcak Karışımların Rijitliğinin Bulanık Mantık ile Bulunması. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 21(4).
- Sedaghat, A., Ram, M. K., Zayed, A., Kamal, R. and Shanahan, N. J. O. j. o. c. m. (2014). Investigation of physical properties of graphene-cement composite for structural applications. 2014.
- Serin, S. and Demirezer, S. E. (2021). Investigation of Wetting and Hydrophobic Properties of Bitumen Modified with Different Vegetable Oils. *Journal of Innovative Transportation*, 2(2).
- Shu, X., Huang, B. and Vukosavljevic, D. (2010). Evaluation of cracking resistance of recycled asphalt mixture using semi-circular bending test. In *Paving materials and pavement analysis* (pp. 58-65).
- Sikdar, P., Jain, S., Bose, S. and Kumar, P. (1999). *Premature cracking of flexible pavements*. Paper presented at the Journal of Indian Roads Congress.
- Sonibare, K., Rucker, G., Zhang, L. J. C. and Materials, B. (2021). Molecular dynamics simulation on vegetable oil modified model asphalt. 270, 121687.
- Sudarsanan, N., Karpurapu, R., Amirthalingam, V. J. G. and Geomembranes. (2019). Investigations on fracture characteristics of geosynthetic reinforced asphalt concrete beams using single edge notch beam tests. 47(5), 642-652.
- Şimşek, A. (2021). *Grafen ile modifiye edilmiş bitümlerin optimizasyonu*. (Yüksek Lisans Tezi). Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Tarar, M. A., Khan, A. H., Qamar, S. and Akhtar, M. N. (2020). Compatibility of sunflower oil with asphalt binders: a way toward materials derived from renewable resources. *Materials Structures*, 53(3), 1-15.
- Tunç, A. (2001). *Yol Malzemeleri ve Uygulamaları*. İstanbul: Atlas Yayın Dağıtım.
- Tunç, A. (2002). *Yol Mühendisliğinde Geoteknik Uygulamaları*. İstanbul: Atlas Yayın Dağıtım.
- Tunç, A. (2004). *Esnek kaplama malzemeleri elkitabı*: Asil Yayın Dağıtım.
- 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, R., Yue, J., Li, R. and Sun, Y. (2019). Evaluation of aging resistance of asphalt binder modified with graphene oxide and carbon nanotubes. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 31(11), 04019274.

- 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.
- 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.
- Xue, B., Pei, J., Zhou, B., Zhang, J., Li, R. and Guo, F. (2020). Using random heterogeneous DEM model to simulate the SCB fracture behavior of asphalt concrete. *Construction Building Materials*, 236, 117580.
- Yalcin, E. and Yilmaz, M. (2022). Characteristics of Bituminous Binders Modified with Waste Oils: Physical, Chemical, and Rheological Properties. *International Journal of Civil Engineering*, 20(12), 1377-1395.
- 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.
- Yıldırım, Y. (2007). Polymer Modified Asphalt Binders. *Construction and Building Materials*, 21(1), 66-72.
- Yılmaz, M. (2011). *Asfaltitin Bitümlü Sıcak Karışımların Mekanik Özellikleri Üzerindeki Etkisinin Araştırılması*. (Doktora Tezi). Fırat Üniversitesi, Elazığ.
- Yılmaz, M. (2013). *Polimer katkılı bitümlü bağlayıcılarla hazırlanan sıcak karışımların kırılma mekaniği ve yorulma bakımından incelenmesi*. (Doktora Tezi). Fırat Üniversitesi, Elazığ.
- Yılmaz, M. and Kök, B. V. (2009). Effects of ferrochromium slag with neat and polymer modified binders in hot bituminous mix. *Indian Journal of Engineering Materials Sciences*, 16(5), 310.
- 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.
- 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.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı:	Ahmet Oğuz DEMİRİZ
Doğum tarihi:	
Doğum Yeri:	
Uyruğu:	
Adres:	
Tel:	
E-mail:	
Eğitim	
Lise:	Erzincan Anadolu Lisesi
Lisans:	Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü (2016)
Yüksek lisans:	Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Ulaştırma Bilim Dalı (2019)
Doktora:	Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Ulaştırma Bilim Dalı (2024)
Yabancı Dil Bilgisi	
İngilizce:	İyi
Üye Olunan Mesleki Kuruluşlar	
Tezden Üretilmiş Yayınlar	