



**GRAFEN İLE MODİFİYE EDİLMİŞ
BİTÜMLERİN OPTİMİZASYONU**

Ayşe ŞİMŞEK

Danışman: Doç. Dr. Osman Ünsal BAYRAK
Yüksek Lisans Tezi
İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı
2021
(Her hakkı saklıdır.)

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

GRAFEN İLE MODİFİYE EDİLMİŞ BİTÜMLERİN OPTİMİZASYONU
(Optimization of Bitumen Modified With Graphene)

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ayşe ŞİMŞEK

Danışman: Doç. Dr. Osman Ünsal BAYRAK

Erzurum
Ağustos, 2021

KABUL VE ONAY TUTANAĞI

Ayşe ŞİMŞEK tarafından hazırlanan “Grafen İle Modifiye Edilmiş Bitümlerin Optimizasyonu” başlıklı çalışması 20/ 08 / 2021 tarihinde yapılan tez savunma sınavı sonucunda başarılı bulunarak jürimiz tarafından İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Ulaştırma Bilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı:	Dr. Öğr. Üyesi Ahmet ATALAY <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır
Danışman:	Doç. Dr. Osman Ünsal BAYRAK <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır
Jüri Üyesi:	Dr. Öğr. Üyesi Emine ÇORUH <i>Gümüşhane Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır

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 Islak İmzalıdır

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

Yüksek Lisans Tezi olarak Doç. Dr. Osman Ünsal BAYRAK danışmanlığında sunulan “Grafen İle Modifiye Edilmiş Bitümlerin Optimizasyonu” 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	0	30
Kuramsal Temeller	19	30
Materyal ve Yöntem	15	35
Bulgular	6	20
Tartışma	7	20
Tezin Geneli	22	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
Ayşe ŞİMŞEK	Doç. Dr. Osman Ünsal BAYRAK
9.8.2021	9.8.2021
İmza: Aslı Islak İmzalıdır	İmza: Aslı Islak İmzalıdır

* 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

Bu çalışmamın tüm aşamalarında bilgi, birikim ve desteklerini esirgemeyen danışman hocam Sayın Doç. Dr. Osman Ünsal BAYRAK’a,

Çalışmalarım için bana destek olan Atatürk Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi (BAP) birimine (FHD-2020-8669),

Çalışmalarımda deney aşamasında yardımlarından dolayı değerli arkadaşım Mervenur KURT’a,

Çalışmalarım boyunca hep yanımda olan aileme özellikle annem ve sevgili ağabeyim Av. Alparslan ŞİMŞEK’e maddi ve manevi her daim beni desteklediği için teşekkürlerimi sunarım.

Ayşe ŞİMŞEK

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

GRAFEN İLE MODİFİYE EDİLMİŞ BİTÜMLERİN OPTİMİZASYONU

Ayşe ŞİMŞEK

Danışman: Doç. Dr. Osman Ünsal BAYRAK

Amaç: Bu çalışmanın temel amacı nano boyutta bir malzeme olan grafen kullanılarak asfalt bağlayıcının performansını kıvamı, agregayı sarma kabiliyeti, sıcaklığa karşı hassasiyeti gibi parametreler saf bitümle karşılaştırılarak değerlendirmektir. Aynı zamanda Taguchi metodu kullanılarak bitümün modifiyesi için kullanılan parametrelerin optimizasyonunu yapmaktır.

Yöntem: Bu çalışmada 70/100 penetrasyonlu saf bitüme modifier olarak grafen % 0.5, %1 ve %1.5 oranlarında katılarak performans özelliklerini değerlendirmek için geleneksel bitüm deneyleri uygulanmış ve sonuçlar yorumlanmıştır. Katkı malzemesi optimizasyonunu belirlemek için Taguchi yöntemi uygulanmış ve optimum değerler bulunmuştur.

Bulgular: Saf bitümün penetrasyon değeri 85,3 elde edilmiştir. Yaşlandırıldıktan sonra ise bu değer 49'a düşmüştür. Grafen katıldıktan sonra ise yaşlanma öncesi en yüksek penetrasyon değeri 77,80, yaşlanma sonrası ise en yüksek 49,70 elde edilirken, en düşük ise yaşlanma öncesi 67,70, yaşlanma sonrası ise 43,40 elde edilmiştir. Yumuşama noktası da penetrasyona bağlı olarak saf bitümde 51 °C elde edilirken, grafen katkısı ile en düşük 54,30 °C en yüksek 60,80 °C olarak belirlenmiştir. Yaşlandırma sonrası saf bitümün yumuşama noktası 58,5 °C olurken grafen katkısı ile sırasıyla en düşük 61,20 °C en yüksek 73,80 °C olarak belirlenmiştir.

Sonuç: Grafen katkısı ile saf bitümün penetrasyon değerinde azalma ve yumuşama noktası değerinde artma gözlemlenmiştir. Aynı zamanda grafen ile modifiye edilen bitümlerin saf bitüme göre sıcaklığa karşı hassasiyetinin azaldığı belirlenmiştir. RTFOT öncesi penetrasyon için %0,5 grafen oranı, 3000 rpm karıştırma hızı ve 30 dakika karıştırma süresi optimum durumu verirken RTFOT sonrası parametrelerin bu seviyeleri %0,5 grafen oranı, 1000 rpm karıştırma hızı ve 30 dakika karıştırma süresi olarak belirlenmiştir. Yine yapılan Taguchi optimizasyonunda, yumuşama noktası için optimum değerler hem RTFOT öncesi hem de RTFOT sonrası için grafen katkısının üçüncü oranı olan %1,5, karıştırma hızının birinci seviyesi olan 1000 rpm ve karıştırma süresinin üçüncü seviyesi olan 60 dakika olarak bulunmuştur.

Anahtar Kelimeler: Modifiye Bitüm, Esnek Yol Üstyapısı, Grafen, Taguchi Metodu, PI

Ağustos 2021, 81 sayfa

ABSTRACT

MASTER THESIS

OPTIMIZATION OF BITUMEN MODIFIED WITH GRAPHENE

Ayşe ŞİMŞEK

Supervisor: Doç. Dr. Osman Ünsal BAYRAK

Purpose: The main purpose of this study is to evaluate the performance of asphalt binder by using graphene what a nano-sized material comparing, with pure bitumen, parameters such as consistency, ability to wrap the aggregate, sensitivity to temperature. At the same time, it is to optimize the parameters used for the modification of bitumen using the Taguchi method.

Method: In this study, traditional bitumen tests were applied and the results were interpreted to evaluate the performance properties by adding 0.5%, 1% and 1.5% of graphene to pure bitumen with 70/100 penetration. The Taguchi Method was used to determine the optimization of the additive material and the optimum values were found.

Findings: The penetration value of pure bitumen was 85.3. This value decreased to 49 after aging. After the addition of graphene, while the highest penetration value was 77.80 before aging, 49.7 after aging, the lowest penetration value was 67.70 before aging and 43.40 after aging were obtained. While the softening point is 51°C in pure bitumen depending on the penetration, it is determined that the lowest is 54.30°C and the highest is 60.80°C with the graphene additive. While the softening point for pure bitummen is 58.5°C after aging, the lowest and the highest values are 61.20°C and 73.80°C, with the addition of graphene, respectively.

Results: A decrease in the penetration value of pure bitumen and an increase in the softening point value were observed with the graphene additive. At the same time, it was determined that the sensitivity of bitumen modified with graphene to temperature decreased compared to pure bitumen. For penetration before RTFOT, while 0.5% graphene ratio, 3000 rpm mixing speed and 30 minutes mixing time were the optimum conditions for, these levels of post-RTFOT parameters were determined as 0.5% graphene ratio, 1000 rpm mixing speed and 30 minutes mixing time. In the Taguchi optimization performed, for both before RTFOT and after RTFOT the optimum values for the softening point were found to be 1.5% the third rate of graphene additive, 1000 rpm the first level of mixing speed, and 60 minutes the third level of mixing time.

Keywords: Modified bitumen, Flexible Pavement, Graphene, Taguchi Method, PI

August 2021, 81 pages

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY TUTANAĞI.....	i
ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
TABLolar DİZİNİ.....	ix
KISALTMALAR DİZİNİ	x
GİRİŞ.....	1
KURAMSAL TEMELLER.....	2
Bitümlü Bağlayıcılar	2
Asfalt	2
Katran.....	5
Bitümlü Bağlayıcının Yapısı, Kimyasal Bileşimi ve Reolojisi.....	6
Asfaltenler	6
Reçineler	6
Aromatikler	7
Doygunlar.....	7
Bitümlü (Esnek) Üstyapıların Tasarımı	7
Asfalt Kaplama Problemleri.....	9
Bozulma ölçütleri	10
Yol üstyapısında oluşan bozulma türleri.....	11
Bitümlü Bağlayıcılarda Yaşlanma	14
Bitümlerin yaşlanma nedenleri	15
Bitümlü Bağlayıcıların Katkı Malzemesi Kullanılarak Modifiye Edilmesi	16
Modifiyerlerin (katkıların) bitümlü karışımlardaki rolü	17
Bitümlü Bağlayıcıların Modifiye Edilme Sebepleri	19
Modifiye Bitüm ve Kullanılan Katkı Maddeleri Hakkında Yapılan Çalışmalar	20
Yaygın olarak kullanılan katkı maddeleri ile yapılan çalışmalar.....	21
Katkı maddesi olarak grafen kullanılan çalışmalar.....	33
MATERYAL VE METOT	36
Kullanılan Malzemeler.....	36

Uygulanan Deneyler.....	38
Penetrasyon deneyi.....	38
Yumuşama noktası deneyi	39
Parlama noktası deneyi	41
Düktilite deneyi.....	42
Dönel ince film ısıtma kaybı deneyi (RTFOT)	43
Taguchi Metodu	44
ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....	46
Numunenin Hazırlanması	46
Penetrasyon Deneyi ve Sonuçları	46
Yumuşama Noktası Deneyi ve Sonuçları	47
Parlama Noktası Deneyi ve Sonuçları	48
Düktilite Deneyi	49
Dönel İnce Film Isıtma Kaybı Deneyi(RTFOT) ve Sonuçları.....	49
Yumuşama noktası deneyi için taguchi metodu uygulanması	50
Penetrasyon deneyi için taguchi metodunun uygulanması	54
Düktilite Deneyi İçin Taguchi Metodunun Uygulanması.....	57
Bitümün Sıcaklığa Duyarlılığının Değerlendirilmesi	59
SONUÇLAR VE ÖNERİLER	62
KAYNAKÇA	65
ÖZGEÇMİŞ.....	69

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Asfalt emülsiyonları ve sıvı petrol asfaltları üretimi için petrol asfaltı akış şeması (Yavuz 2002).....	5
Şekil 2. Esnek üstyapı tabakaları.....	8
Şekil 3. Tekerlek izi hasarı örneği (Avcı 2009)	12
Şekil 4. Bitümün zaman içerisinde yaşlanması (Lav 2004)	15
Şekil 5. Bitümün statik yükler karşısındaki davranışı (Read ve Whiteoak 2003).....	17
Şekil 6. Bitümün dinamik yükler karşısındaki davranışı (Read ve Whiteoak 2003)	18
Şekil 7. Grafen ve özellikleri.....	37
Şekil 8. Penetrasyon deney aleti.....	38
Şekil 9. Yumuşama noktası halka ve bilye boyutları (TC Bayındırlık Bakanlığı 1988)	40
Şekil 10. Halka tutucu boyutları (TC Bayındırlık Bakanlığı 1988)	40
Şekil 11. Yumuşama noktası deney düzeneği	41
Şekil 12. Yumuşama noktası deneyi	41
Şekil 13. Parlama noktası deneyi	42
Şekil 14. Düktilite deneyi.....	43
Şekil 15. RTFOT deney düzeneği	43
Şekil 16. Parametrelerin yumuşama noktası üzerinde etkisi- RTFOT öncesi.....	52
Şekil 17. Parametrelerin yumuşama noktası üzerinde etkisi- RTFOT sonrası.....	52
Şekil 18. Parametrelerin penetrasyon üzerinde etkisi- RTFOT öncesi	55
Şekil 19. Parametrelerin penetrasyon üzerinde etkisi- RTFOT sonrası	55
Şekil 20. Parametrelerin düktilite üzerinde etkisi	58
Şekil 21. Penetrasyon indeksi.....	59
Şekil 22. RTFOT öncesi bitümün elastik rijitliğinin sıcaklık ile değişimi.....	60
Şekil 23. RTFOT sonrası bitümün elastik rijitliğinin sıcaklık ile değişimi.....	61

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. Asfalt Çimentolarının Sınıflandırılması	3
Tablo 2. 100 Pen Bitümün Dört Grubunun Tipik Element Analizi (David and Whiteok 2004)7	
Tablo 3. Grafenin Özellikleri.....	36
Tablo 4. Penetrasyon Değerleri Arasında Olabilecek En Büyük Farklar(Erkuş 2017)	38
Tablo 5. Karışım Parametreleri.....	46
Tablo 6. Penetrasyon Deney Sonuçları	46
Tablo 7. Yumuşama Deneyi Sonuçları	48
Tablo 8. Parlama Noktası Deneyi Sonuçları.....	48
Tablo 9. Düktilite Deneyi Sonuçları	49
Tablo 10. RTFOT Deney Sonuçları.....	50
Tablo 11. Taguchi Metoduna Göre Yumuşama Noktası Deney Sonuçları	50
Tablo 12. Yumuşama Noktası Deneyi Ortalama S/N Etkileri- RTFOT Öncesi.....	50
Tablo 13. Yumuşama Noktası Deneyi Ortalama S/N Etkileri- RTFOT Sonrası.....	50
Tablo 14. Yumuşama Noktasını Optimum Yapan Koşullar ve Performans Tayini- RTFOT Öncesi	51
Tablo 15. Yumuşama Noktasını Optimum Yapan Koşullar ve Performans Tayini- RTFOT Sonrası	51
Tablo 16. Taguchi Metoduna Göre Penetrasyon Deney Sonuçları.....	54
Tablo 17. Penetrasyon Deneyi Ortalama S/N etkileri- RTFOT Öncesi.....	54
Tablo 18. Penetrasyon Deneyi Ortalama S/N Etkileri- RTFOT Sonrası	54
Tablo 19. Penetrasyon Değerini Optimum Yapan Koşullar ve Performans Tayini- RTFOT Öncesi	54
Tablo 20. Penetrasyon Değerini Optimum Yapan Koşullar ve Performans Tayini- RTFOT Sonrası	55
Tablo 21. Taguchi Metoduna Göre Düktilite Deney Sonuçları.....	57
Tablo 22. Düktilite Deneyi Ortalama S/N Etkileri	57
Tablo 23. Düktilite Değerlerini Optimum Yapan Koşullar ve Performans Tayini	57
Tablo 24. Penetrasyon İndeksi.....	59

KISALTMALAR DİZİNİ

μ	: Performans değerinin genel ortalaması
e_i	: <i>i.</i> deneydeki rassal hata
M_1	: İlk numune ağırlığı (gr)
M_2	: Deney sonrası numune ağırlığı (gr)
n	: Bir deney kombinasyonunda yapılan tekrar sayısı
P_1	: Deney öncesi penetrasyon (0.1 mm)
P_2	: Deney sonrası penetrasyon (0.1 mm)
P_{25}	: Bitümün 25°C deki penetrasyon değeri
PI	: Pentrasyon indeksi
S/N	: Performans istatistiği (sinyal/gürültü oranı)
S_b	: Bitümün elastik rijitliği (MPa)
T_1	: Deney öncesi yumuşama noktası (°C)
T_1	: Deney sonrası yumuşama noktası (°C)
T_{RB}	: Yumuşama noktası (°C)
t_w	: Yükün etki süresi (s)
T_{YN}	: Yumuşama noktası
X_i	: Deneydeki parametre – seviye kombinasyonunun sabit etkisi
Y_i	: <i>i.</i> deneyin performans istatistiği

GİRİŞ

Ülkemizdeki yolların yaklaşık %95'i esnek üstyapılardan oluşmaktadır. Yol üstyapıları hem fiziksel hem de mekanik yüklere maruz kalmakta ve bu yüklerin etkisiyle farklı bozulmalar meydana gelmektedir. Araştırmacılar, bu bozulmaların üstesinden gelmek için yol üstyapısında kullanılan bitümü farklı katkı malzemeleriyle modifiye etmektedir. En çok kullanılan katkı malzemelerinden bazıları stiren bütadienestiren, stiren-buadienerubber, polietilen, epoksi reçine, etil vinil asetat, nanoklay partikülleri, poliolefinler olarak bilinmektedir.

Bu katkılardan biri olan grafen, farklı alanlarda kullanılmakla birlikte, yol mühendisliğinde de yeni nesil asfalt bağlayıcıların geliştirilmesi için umut verici bir malzeme olarak kabul edilmektedir. Bir karbon allotropu olan grafen, iki boyutlu yapıda ve tabaka halindeki bir malzemedir. Yapısında bulunan karbon atomlarının iki boyutlu altıgen bir yapıda dizilmiş bu formunun grafene hayal edilemeyecek pozitif özellikler sağladığı göz önüne koyulmuştur. Bu malzeme, günümüzde herkesin bildiği en sağlam malzeme olan çelikten 100 – 300 kat daha sağlam, esnek ve saydam özelliğine ek olarak bilinen en hafif ve ince malzeme olarak da literatürde yer edinmiştir. Bununla birlikte, grafenin bitüme ekleyebileceği potansiyel avantajlara rağmen, şu anda mevcut bağlayıcıların performansına gerçek katkısını ölçebilen çok az çalışma vardır. Bu nedenle bu araştırma grafen ile modifiye edilmiş bağlayıcıların Karayolları Genel Müdürlüğü modifiye bitüm şartnamesine uygunluğunu değerlendirmeyi ve optimum kullanım miktarını belirlemeyi amaçlamıştır.

Yapılan tez çalışmasının, bitüm katkı malzemeleri ile ilgili yapılacak çalışmalara fayda sağlayacağı ve gelecekte bu katkı malzemesinin Türkiye'de uygulanması yönünde bir adım olacağı düşünülmektedir.

KURAMSAL TEMELLER

Bitümlü Bağlayıcılar

Bitüm, ısısal (pirojene) veya doğal kökenli ya da her ikisine dayanan, gaz, sıvı, yarı katı, katı halde olabilen sıklıkla metalik olmayan türevler içeren ve karbondisülfürde (C_2S) tamamen çözünebilen hidrokarbon maddedir. Bitüm, yapısında çoğunlukla bulunan hidrokarbon molekülleriyle kısıtlı miktarda bulunan sülfür, nitrojen ve oksijen atomlarından meydana gelen karmaşık bir kimyasal karışımdır. Bitümlü bağlayıcılar iki farklı bölümde incelenirler. Bu bölümler asfaltlar ve katranlardır. (Erkuş 2017).

Asfalt

Asfalt, genel olarak iki şekilde elde edilir. Birincisi doğada hazır halde bulunan, bir diğeri ise ham petrolün rafinerilerde damıtılması ile elde edilen koyu kahverengi-siyah renkte sıvı veya semi-katı halde bulunabilen kuvvetli bağlayıcı özelliğe sahip hidrokarbonlardan oluşan bir maddedir. Asfaltlar, kökenlerine göre doğal ve yapay olarak iki gruba ayrılabilir.

Genellikle doğada mineral maddelerle karışmış olarak bulunan doğal asfaltlar, bulundukları yere göre kaya veya göl asfaltı olarak adlandırılırlar. En çok bilinen göl asfaltı adını bulunduğu adadan alan ve Güney Amerika'da olan Trinidad göl asfaltıdır. Bu göl asfaltının ezervi 10-15 milyon ton olarak bilinmektedir ve rafine işleminden sonra % 55 bitüm, % 35 mineral madde ve % 10 organik madde içerir. Göl asfaltlarının aksine kaya asfaltları mineral maddeler ile en fazla % 12 bitüm içerirler.(Yağız vd 1967)

Ham petrol, petrol kuyularından çıkarıldıktan sonra rafinerilerden pompalar yardımıyla tanklara ardından ısıtma kulesi adı verilen kulelere gönderilerek sıcaklığı yükseltilir en son damıtma kulelerine gelir. Damıtma kulelerinin üst kısmından ham petrolün kolay olarak uçan kısımları çıkar ve soğutucularda yoğunlaştırılarak ayrılırlar. Kolay uçucu olanlar hafif ürünler, daha az uçucu özelliğe sahip olanlar orta ürünler, en ağır olanlar ise ağır ürünler olarak adlandırılır.

İçerisinde asfalt bulunduran kalıntı kısım ise kulenin dibinde birikir. Ham petrol bu serüven sonucunda beş kısma ayrılır. Bunlar:

1. Benzin olarak adlandırılan gazolin,
2. Gaz yağı olarak bilinen kerosen,
3. Mazot olarak bilinen gaz yağları,
4. Yağlama yağları ve

5. Ağır kalıntı maddeleridir.

Asfalt çimentoları

Kulenin dibinde biriken kalıntı maddelerinin tekrar damıtılması ile SC sınıfı yavaş kür olma özelliğine sahip yol yağları oluşur ve geriye asfalt çimentosu kalır. Asfalt çimentoları AC ile gösterilirler ve 10- 300 arasında değişen penetrasyon derecelerine göre sınıflandırılırlar (Tablo 1). Bu penetrasyon asfaltları daha sert olanların daha yumuşak olanlar ile karıştırılmasından elde edildiği gibi sert olanların yüksek kaynama noktalı bir yağ ile yumuşatılması suretiyle de elde edilebilir.(TC Bayındırlık ve İskan Bakanlığı 1988)

Tablo 1. Asfalt Çimentolarının Sınıflandırılması

Penetrasyon Sınıflaması	Viskozite Sınıflaması
40-50 Pen AC	AC-20
60-70 Pen AC	AC-40
85-100 Pen AC	AC-10
120-150 Pen AC	AC-5
200-300 Pen AC	AC-20,5

Blown asfalt veya okside asfalt

Bu asfalt; çatı kaplama, boru yalıtımı, partiand çimentolu beton yol kaplamaları alt yalıtımı, membran zarfı ve hidrolik uygulamalar gibi belirli özel uygulamalar için arzu edilen özelliklerin kazandırılması için içine yüksek sıcaklıkta hava üflenerek işlenen asfaltı ifade etmektedir (Yavuz 2002).

Katbek (Cutback) asfaltları

Petrol çözücülerini [aynı zamanda (inceltici) olarak da adlandırılmaktadır] ile harmanlanarak sıvılaştırılmış asfalt çimentosu. Atmosferik koşullara maruz bırakıldığında, incelticiler buharlaşarak asfalt çimentosunun bağlayıcılık ve geçirimsizlik fonksiyonlarını yerine getirmesini sağlamaktadır. Kullanılan resmi terim sıvı petrol asfaltlarıdır.(SPA)(İsfalt 2002)

a. Hızlı Kür olan (RC) SPA- Asfalt çimentosu ile nafta veya benzin tipi yüksek uçuculuğa sahip bir çözücülerden oluşan asfalt.

b. Orta Hızda Kür Olan (MC) SPA- Asfalt çimentosu ile kerosen tipi orta uçuculuğa sahip çözücülerden oluşan asfalt.

c. Yavaş Kür Olan (SC) SPA- Asfalt çimentosu ile düşük uçuculuğa sahip yağlardan oluşan asfalt.

d. Yol Yağı- Genellikle Yavaş Kür Olan (SC) ağır bir petrol yağı.

Asfalt emülsiyonları

Emülsiyon haline getirme prosesinde, ılık asfalt çimentosu çok küçük globüller haline gelecek şekilde mekanik olarak öğütülmekte, ardından az miktarda emülgatörün yer aldığı bir su içinde dağıtılmaktadır. Su, sürekli faz; asfalt zerrecikleri ise dağınık faz olarak adlandırılmaktadır. Bu işlemde kullanılan makina bir kolloid değirmen olup, üretilen asfalt globülleri çoğunlukla kolloidal boyut aralıklarında (5-10 mikron ve daha küçük) olacak kadar küçüktür. Emülgatörün uygun seçimi ve diğer üretim kontrolleri sonucunda, asfalt emülsiyonları çeşitli tip ve sınıflarda üretilmektedir. Emülgatörün uygun seçimi ve bağlı olarak asfalt emülsiyonları aşağıdaki durumlarda bulunabilmektedir:

1. Anyonik-asfalt globülleri elektro-negatif yüklü,
2. Katyonik-asfalt globülleri elektro-pozitif yüklü, ve
3. İyonik olmayan-asfalt globülleri nötr

Asfalt emülsiyonu bir yolun yüzeyine püskürtüldüğünde veya agrega ile karıştığı kesilir, yani asfalt kürecikleri sıvı ortamdan ayrılarak agreganın üzerine yapışırlar ve serbest kalan suda buharlaşma meydana gelir. Bu arada serbest kalan su buharlaşır. Yolda kullanılan asfalt emülsiyonları kesilme hızlarına göre aşağıdaki gibi sınıflandırılırlar:

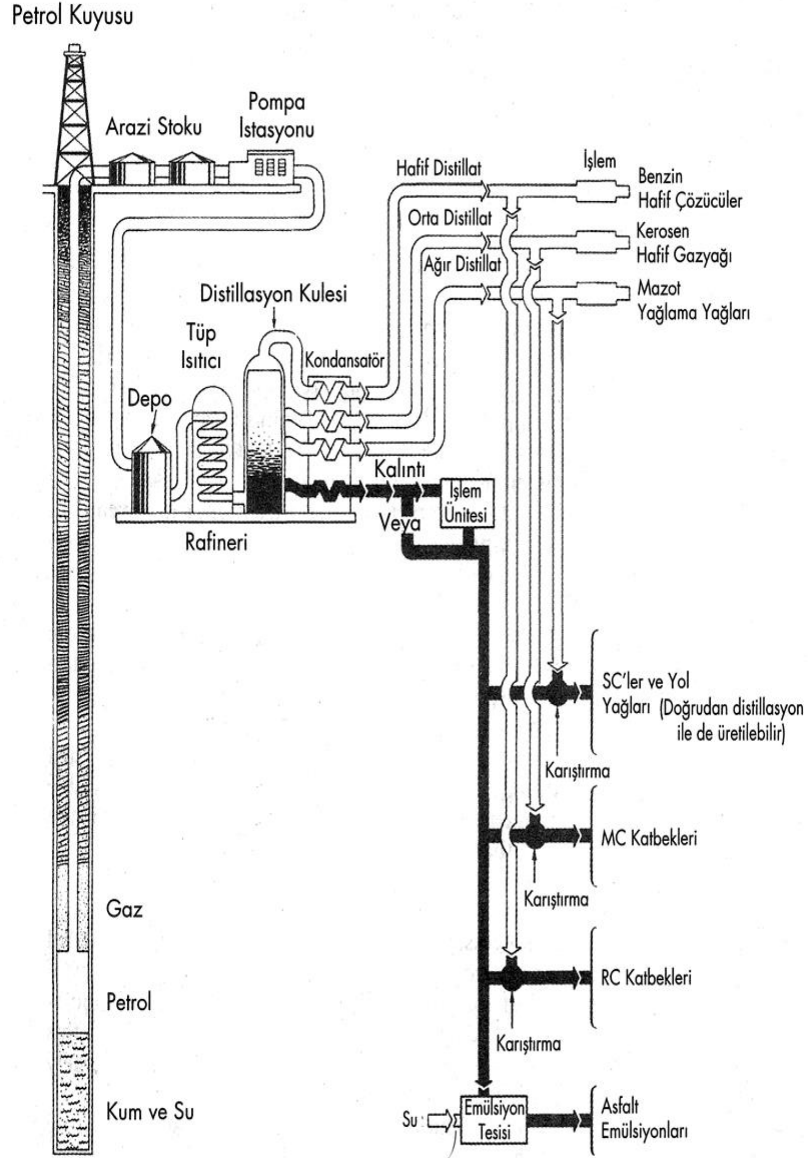
- Çabuk kesilen asfalt emülsiyonları (RS),
- Orta hızda kesilen asfalt emülsiyonları (MS),
- Yavaş kesilen asfalt emülsiyonları (SS) olarak üçe ayrılırlar (Yavuz 2002)

Asfalt emülsiyonlarının kullanım sıklığı, ülkemizde ve dünya genelinde her geçen yıl artan bir ivme kazanmaktadır. Yol inşaatı ve bakım uygulamalarında genellikle anyonik ve katyonik asfalt emülsiyonu kullanılmaktadır. Bununla birlikte iyonik olmayan asfalt emülsiyonları da, emülsiyon teknolojisi ilerledikçe daha yaygın bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır.

Asfalt emülsiyonlarının kullanım alanları şu şekildedir:

1. Sathi kaplamalar,
2. Karışım kaplamalar,
3. Harç kaplamalar,
4. Yama ve tamir işleri,

5. Penetrasyon makadam yol kaplamaları (TC Bayındırlık Bakanlığı 1988).



Şekil 1. Asfalt emülsiyonları ve sıvı petrol asfaltları üretimi için petrol asfaltı akış şeması (Yavuz 2002).

Katran

Bitümün aksine katran ham petrolden değil kok kömürü veya dumansız katı yakıt mamullerinden elde edilmekte ve genelde her iki terim de eşanlamlı olarak kullanılmaktadır. Bu kullanımın iki sebebi vardır. Birincisi, çıplak gözle çevre sıcaklığında bakıldığında, yüksek viskoziteye sahip siyah termoplastik özellikleri ile iki maddenin birbirine çok benzemesi, ikincisi ise, bu iki maddenin de yol yapımı, çatı izolasyonu ve birçok endüstriyel uygulamada benzer şekilde kullanılmasıdır. Ancak benzerlik buraya kadardır. Çünkü bu iki madde sadece kökenleri ile değil ayrıca kimyasal yapılarıyla da birbirinden farklıdır. Farklı fiziksel ve kimyasal yapıları, uygulama sırasında ve sonrasındaki performanslarında çeşitli davranış farklılıkları göstermekte ve farklı gaz/buhar emisyonları vermektedir.

Katran terimi; odun, kömür vb. doğal organik malzemelerin karbonize edilmesi ya da havasız bir ortamda damıtılma işlemi görmesiyle elde edilen sıvıya verilen bir isimdir. Katran terimi genelde elde edildiği maddenin adı arkasından kullanılır. Örneğin; ham kömür katranı, ham odun katranı, vb. şeklinde adlandırılmaktadır (Lav 2004).

Bitümlü Bağlayıcının Yapısı, Kimyasal Bileşimi ve Reolojisi

Bitüm reolojisi, malzemedeki hakim hidrokarbon moleküllerin kimyasal bileşimi (kimyasal kompozisyon) ve fiziksel yapısı (fiziksel düzen) ile belirlenmektedir. Bileşimde ve yapıda ya da her ikisinde de gerçekleşecek herhangi bir değişiklik bitüm reolojisinde de bir değişikliğe sebep olacaktır. Dolayısıyla, bitüm reolojisindeki değişiklikleri anlamak için, bir bitümün bileşim ve yapısının reolojiyi etkileyecek ne tür bir etkileşim içerisinde olduğunu bilmek önem arz etmektedir (Lav 2004).

Bitümün kimyasal içeriği karmaşık bir yapıda olduğu için malzemenin detaylı kimyasal analizi çok ayrıntılı incelemeler gerektirmekte ve sonuçta reolojik özelliklerle korelasyonu üstesinden gelinemeyecek bir durum meydana getirecek derecede çok fazla veri ortaya çıkmaktadır. Bu durumun aksine bitümü maltenler ve asfaltenler olarak isimlendirilen iki büyük kimyasal sınıfa ayırmak bahsedilen analizler için kolaylık sağlayacaktır. Maltenleri kendi aralarında reçineler, aromatikler ve doygunlar olarak alt sınıflara ayırırlar (Erkuş 2017).

Asfaltenler

Asfaltenler, esas olarak karbon ve hidrojenden oluşan ve içerisinde bir miktar sülfür, nitrojen ve oksijen içeren n-heptan içerisinde çözünmez kahverengi veya siyah amorf katılara denir. Asfaltenler, nispeten yüksek molekül ağırlığına sahip, polar (elektriksel yüklere sahip) ve karmaşık aromatik maddelerdir. Molekül ağırlıkları 600 – 300 000 arasında değişir ve bitümün %5-25'ini oluşturur.(Bayrak 2021)

Reçineler

Reçineler olarak adlandırılan malten sınıfı asfaltenlerin aksine n-heptanda çözünürler. Yapılarında büyük miktarlarda hidrojen ve karbonla küçük miktarlarda oksijen, sülfür ve nitrojen içerirler. Koyu kahve renkli, katı ya da yarı katı ve oldukça polar haldedirler. Bu özellik reçinelerin kuvvetli adezyona sahip olmalarını sağlar. Molekül ağırlıkları 500 – 50000, bir partikül boyutu 1.5µm Bir H/C atom oranı 1.3 – 1.4 arasındadır.

Aromatikler

Bu malten sınıfı bitümlü bağlayıcı içerisindeki en az moleküler ağırlıklı naftenik aromatik bileşenlerden oluşmakta ve bitüm içerisine asfaltlenlerin yayılımları için gereken ortamın büyük bir payını üstlenirler. Aromatikler, toplam bitümün %40 - %65 ini oluşturur ve renkleri koyu kahverengi olup viskoz özellikteki sıvılardır.

Doygunlar

Doygunlar, saman yada beyaz renkteki polar olmayan viskoz yağlardır. Doygunlar bitüm içeriğinin yaklaşık olarak %5~20'sini oluşturmaktadır.

Tablo 2. 100 Pen Bitümün Dört Grubunun Tipik Element Analizi (David and Whiteok 2004)

	Bitümdeki (sistemde) Oranı %w	Karbon %w	Hidrojen %w	Nitrojen %w	Sülfür %w	Oksijen %w	Atomik Oranı H/C	Moleküler ağırlık
Asfaltlenler (n-heptan)	5.7	82.0	7.3	1.0	7.8	0.8	1.1	11300
Reçineler	19.8	81.6	9.1	1.0	5.2	-	1.4	1270
Aromatikler	62.4	83.3	10.4	0.1	5.6	-	1.5	870
Doygunlar	9.6	85.6	13.2	0.005	0.3	-	1.8	835

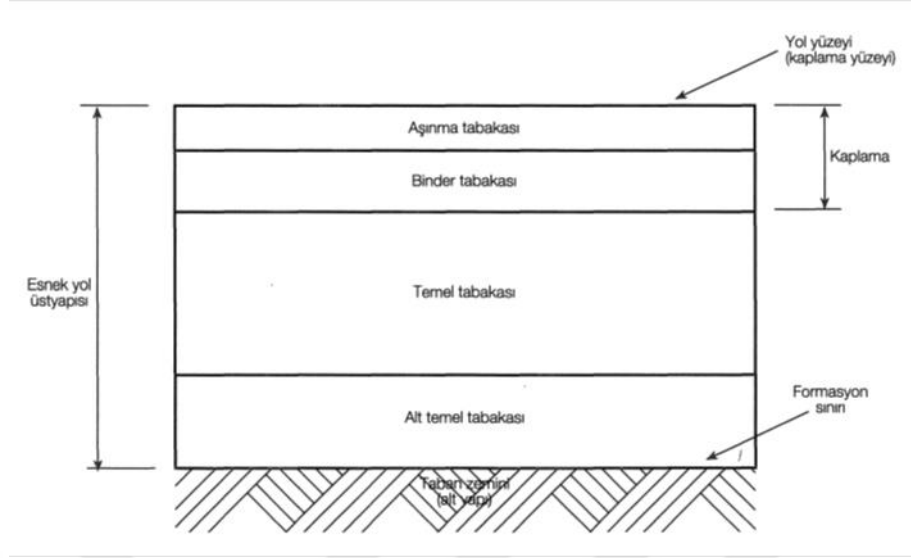
Bitümlü (Esnek) Üstyapıların Tasarımı

Yol üstyapısı tasarımı yapılırken, doğacak maliyet ve hizmet süresi boyunca yapılacak bakım masraflarını en aza indirmek ve trafik yüklerini etkili bir şekilde dağıtabilen bir tasarım yapmak amaçlanmıştır. Bu tasarım trafik yüklerinin kaplama ve alt tabakalarda oluşturduğu gerilme ve şekil değiştirmenin o tabakadaki malzemelerin kapasitesince dağıtılmasını sağlar. Bu işlem farklı tabakalar için uygun malzemelerin seçimi ile gerekli kalınlığın hesaplanmasını da kapsar. Kaplamanın trafik yüklerini taşıma kapasitesi kullanılan malzemenin kalınlığına ve dayanıklılığına bağlıdır. Bu sebepten dolayı, bir yol üstyapısı tabakalarını oluşturan malzemelerin mekanik özellikleri yapının tasarımında önemli bir yere sahiptir. Yol üst yapısının performansına etki eden bir diğer unsur da iklimsel koşullardır. Suyun varlığı ve miktarı taban zeminini (altyapı), alt temeli veya granüler tabakaları etkilerken, sıcaklık bitümlü tabakaları etkiler. Bu yüzden, üstyapı tasarımı yapılırken iklimsel etkiler de göz önünde bulundurulmak zorundadır.

Esnek üstyapılar, Şekil 2. 'de gösterildiği gibi, üç kısımdan oluşur:

- üstyapının temeli (taban zemini veya altyapı);

- temel tabakaları;
- kaplama tabakaları.



Şekil 2. Esnek üstyapı tabakaları

Yol üstyapılarının temeli

Bir üstyapının temeli esas olarak iki tabakadan oluşur. Alt temel olarak adlandırılan üst tabaka kaliteli granüler malzemeden oluşmaktadır. Yol tabanı denilen altyapı ise üstyapının üzerine inşa edildiği yüzeyi oluşturan doğal zemin veya dolgu malzemesidir. Bu iki tabaka arası tesviye yüzeyi olarak adlandırılır.

Bazen ilave tabakalara ihtiyaç duyulur. Alt temelin kalın olması istendiği durumlarda orta kalitede bir tabakanın kısmi olarak kullanılması daha ekonomik olabilir. Bu tabaka taban zemininin kireç veya çimento ile stabilize edilmesi veya bir tabaka agrega serilmesi ile oluşturulabilir.

Alt temel dört ana fonksiyonu yerine getirir:

- trafik (dingil) yüklerini yol tabanına yayan yapısal bir tabaka oluşturmak
- inşaat faaliyetlerine uygun bir çalışma platformu sağlamak ve bitümlü malzemelerin üzerine yayılıp sıkıştırılabileceği bir yüzey oluşturmak;
- yol tabanını donmaya karşı korumak;
- üstyapıya gelen suyun uzaklaştırılmasını sağlayan bir drenaj tabakası görevi görür.

Bununla birlikte, böyle bir drenaj tabakasının yapılması yoğunluğu ve rijitliği fazla, dingil yüklerini taşıyan ve diğer tabakalara aktaran tabakalarla uyumlayabilir. Bu tabakadaki malzemenin drenaj özelliği göstermesine nadiren ihtiyaç duyulur ve genellikle iyi bir şekilde hazırlanmış ve uygun sıkıştırılmış bir alt temelin sağladığı yüksek mukavemet tercih edilir.

Temel tabakası

Temel tabakası bir üstyapının ana elemanıdır. Bu tabakanın fonksiyonu maruz kalınan yükü alt tabakalarda bulunan malzemelerin aşırı gerilmeye maruz kalmasını önleyecek şekilde dağıtmaktır. Tekrarlı yüklerden dolayı oluşan yorulma çatlakları ve kalıcı deformasyona direnç göstermelidir. Ayrıca üstyapıyı etkileyen sıcaklık farklarının neden olduğu gerilmelere karşı dirençli olmalıdır. Temel tabakası genelde bitümle stabilize edilir (ülkemizde bitümlü temel tabakası olarak adlandırılır), ancak düşük mukavemetli beton veya çimento ile stabilize edilmiş malzemeler de kullanılabilir. Trafik miktarı fazla olmayan yollarda ise granüler temel tabakaları kullanılabilir.

Kaplama tabakaları

Kaplama (bitümlü) tabakaları genellikle iki kısımdan oluşur. Alt tabakaya binder tabakası adı verilmektedir. Bu tabakanın amacı aşınma tabakasının üzerine yerleştirilebileceği iyi şekillendirilmiş bir yüzey sağlamak ve trafik yüklerini temel tabakası üzerine dağıtmaktır. Genelde 60 mm kalınlığında yapılır.

Binder tabakasının üzerinde aşınma tabakası bulunur. Bu tabaka aşağıda belirtilen birtakım koşulları sağlamalıdır:

- trafiğin sebep olduğu deformasyona dirençli olmak,
- geçirimsiz olmak, böylece üstyapının alt tabakalarını korumak.
- Ancak özellikle geçirgen olarak tasarlanmış kaplamalar (poroz kaplamalar) hariçtir
- dayanıklı olmak, hava, yorulma ve trafiğin cilalandırma etkilerine karşı direnç göstermek;
- kaymayı önleyen bir yüzey sağlamak;
- üstyapının mukavemetine katkıda bulunmak;
- kabul edilebilir bir sürüş kalitesi sağlamak.

Asfalt Kaplama Problemleri

Yol üst yapısında meydana gelen gerilmeler iki gruba ayrılabilir.(Tayfur 2001)

1. Trafik yüklerinin oluşturduğu gerilmeler,
2. Sıcaklık ve nemin (iklim koşullarının) değişiminden doğan gerilmeler,

Bu gerilmeler, yol üstyapısının performansını ilk yapıldığı yıla göre zamanla düşürür ve bir süre sonra kullanılamaz hale getirebilir. Yolların, bu bozulma sürecinde, yüksek hız ve hacimde trafiğe hizmet edebilme yetenekleri ile sahip oldukları sürüş konforu değerlendirilerek, bir servis yeteneği indeksi kavramı geliştirilmiştir. AASHTO tarafından geliştirilen bu

dereceleme, yol üzerinde yapılan bir dizi fiziksel ölçüm (tekerlek izi oluşumu, çatlak uzunluğu, yama miktarı vb.) yapılarak saptanır (AASHTO 1986).

Bozulma ölçütleri

Bozulma ölçütleri; servis yeteneği indeksi, tekerlek izi derinliği, çatlak oluşumu ve defleksiyon olarak dört ana başlık altında toplanabilir.(Ilıcalı vd 2001).

Servis yeteneği indeksi

Taşıtların konforlu ve emniyetli olarak uzun süre seyahat edebilmelerinin göstergesi kaplamanın performansıdır. Kaplamanın performansı AASHTO-1986 tasarım yönteminde ‘servis yeteneği’ terimi ile tanımlanmaktadır. AASHTO yol testinde kaplamanın başlangıçta sahip olduğu ve belirli bir kullanımı sonunda azalan servis yeteneğine göre kaplamanın performansının nasıl değiştiğini saptamaya çalışılmış ve buna göre tasarım formülleri geliştirilmiştir.

Tekerlek izi derinliği

Esnek üstyapılarda görülen bu bozulma tür belirli bir seviyeyi geçtiği zaman, yol sathı bozulmuş kabul edilir ve tekerlek izi derinliğinin büyüklüğüne göre, onarım ya da bakım kararı verilir. Tekerlek izi oluşumu 1,0-2,5 cm’yi aşan yollarda, onarım, bakım kararı verilmektedir.

Çatlak oluşumu

Çatlaklar esnek yol üstyapısında, çekme ve basınç gerilmelerden dolayı, yol eksenine paralel veya dik doğrultuda oluşan yarılmalardır. Genel olarak 6 mm’den büyük genişlikteki çatlakların artması ve trafik altında çatlak kenarlarının kopması, kırılması çatlak açısından yolun bakım gerektirdiğinin bir işareti olarak görülmelidir.

Defleksiyon

Yol üstyapısının, üzerinden geçen tekerlek yükleri altında, düşey yönde ve geçici olarak meydana gelen bozulmalar ‘defleksiyon’ diye adlandırılır. Üstyapının tekerlek yükleri altında gösterdiği defleksiyon, elastik deformasyon şeklindedir yani yükün uygulanmasıyla meydana gelen defleksiyon yükün ortadan kalkmasıyla geri döner. Ancak, trafik yükünün kısa aralıklarla tekrarlanması yüzünden, esnek üstyapı sürekli geri gelen deformasyonların etkisinde kalmakta ve yorulmaktadır. Bunun anlamı, yüksek defleksiyonlar yol üstyapısının zayıf olduğunun göstergesidir ve defleksiyonlar arttıkça üstyapıdaki bozulmalar da artmaktadır.

Yol üstyapısında oluşan bozulma türleri

Yol üstyapısında meydana gelen bozulma türleri genel olarak aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir. (Lav 2004)

Oturma ve çökme

Bu tip bozulmalar, üstyapının tasarlandığı trafik yükünden daha ağır bir yüke maruz kalmasından veya dengeli bir yapıya sahip olmayan malzemenin kullanıldığı kaplama altındaki tabakaların oturması, çökmesi, büzülmesi ve kabarması gibi nedenlerle meydana gelir.

- Oturmalar

Kaplama altındaki malzemenin oturması sonucu oluşur. Nedenleri aşağıda sıralanmıştır(Sağlık ve Güngör 2006)

- Alt tabakaların kalınlıklarının yetersiz olması,
- Taban, alttemel veya temel tabakalarında yetersiz sıkışma,
- Üstyapı tabanının taşıma gücünün zayıf olması,
- Dolgu şevinde sıkıntılar,
- Yer altı su seviyesinin yüksekliği,
- Yapılan drenajın yetersiz olması,
- Uygun olarak yapılmayan bakımlar,

- Çökmeler

Çökme, kaplama yüzeyinin ötelenmesini de içeren yerel bir plastik hareket biçimidir. Orijinal kaplama yüzeyine göre düşük kotta kalmış küçük çukurluklardır. Derinlikleri 2,5 cm ya da daha fazla olabilmekte ve yağmurlardan sonra içlerine su dolmaktadır. Çapları değişkendir. Sebepleri aşağıda sıralanmıştır (Sağlık ve Güngör 2006).

- Temel ve alttemel tabakalarının stabilite yetersizliği,
- Kaplamanın yapım sırasında yetersiz bir şekilde olarak belli bölgede sıkıştırılması,
- Yetersiz drenaj yüzünden suyun temel altında birikimi,
- Alttemel ve temel malzemelerinin kil ile karışması,
- Kaplamanın taşıyabileceğinden daha ağır trafik yükü ile karşılaşması
- Kötü işçilik ve yapım hataları

Tekerlek İzi Oluşumu (oluklanmalar)

Tekerlek izi oluşumu, esnek yol üstyapısındaki tekerlek geçen kısımlarda oluşan ve kalıcı olan deformasyonlardır. Bu bozulma türü, trafik hareketleri altında bir ya da aşınma

tabakasının şekil değiştirmesinden veya birkaç alt tabakanın konsolidasyonundan, yanal hareketinden kaynaklanabilmektedir.(Şekil 3)

Tekerlek izi oluşumu, bitümlü sıcak karışımlar veya road-mix karışım tipi kaplamalarda, tekerlek etkisiyle oluşmaktadır.



Şekil 3. Tekerlek izi hasarı örneği (Avcı 2009)

Ondülasyonlar ve çökme

Ondülasyon ve çökme ya da kıvrımlanma, olarak adlandırılan bu tür bozulma türü kaplamadaki dalgalanmalar ile tanımlanan plastik bir hareket biçimidir. Çökme, kaplama yüzeyindeki ötelelenme de içeren yerel bir plastik hareket biçimidir. Bu iki bozulma türü de genellikle trafiğin duruş ve kalkış hareketleri yaptığı yerlerde veya taşıtların sık sık fren yaptıkları inişlerde görülmektedir.

Çökme ve ondülasyon aynı zamanda stabilite açısından zayıf asfalt kaplama karışımlarında da meydana gelebilmektedir. Aşırı miktarda asfalt, olması gerekenden fazla ince agrega, uygun olmayan gradasyon, yuvarlak ya da düzgün dokulu kaba agrega kullanımı buna sebep olmaktadır. Ayrıca karışımlarda katbek veya emülsiyon kullanılması durumunda havalandırma eksikliği de bu tür bozulmalara sebep olmaktadır.(Yavuz 2002)

Kabarmalar

Bu tip bozulma, tabii zeminin veya üstyapının bir kısmının şişmesi sonucunda yukarı yönde yer değiştirmesinden kaynaklanmaktadır. Kabarmaların en bilinen sebebi tabii zemin içinde oluşan buzun genişmesi veya yol üstyapısı içerisindeki granüler tabakalardır. Ayrıca kabarma, bazı zeminlerde şişmeye neden olan nemden de kaynaklanabilmektedir.

Tabii zemin içinde meydana gelen buz genişlemelerinin iyileştirilmesi için su kaynağının donma derecelerinden yalıtılması veya üstyapı altında bulunan suyun dışarıya çıkarılması gerekmektedir. Suyu donma derecelerinden yol üstyapısının altına yalıtım tabakaları koymak

veya tabii zemini don derinliğinin altına kadar suyun drene edilmesine yardımcı olacak granüler malzeme ile değiştirerek yalıtım mümkündür. Su kaynağı tespit edilebilirse yeraltı drenajı etkili olabilir. Kabarma durumunda üstyapı kaldırılıp yenilenmelidir.

Şişme gösteren zeminlerden dolayı oluşan kabarma ise tabii zemine su erişimini engellemek amacıyla drenaj sistemlerinin döşenmesi ile ortadan kaldırılabilmektedir. Sürüş kalitesinin yeniden sağlanması amacıyla bakım çalışmaları, yüzeyin soğuk frezeleme ve bir sathi kaplama ya da ince ek tabakanın serilmesi ile gerçekleştirilebilmektedir. Drenaj başarısız olur ise, üstyapının tamamen kaldırılması ve yeniden inşa edilmesi tek çözüm olmaktadır (Yavuz 2002).

Çatlaklar

Bu tür bozulmalar; yoğunlukla aşırı trafik yüklerinden ve bunların fazla tekrarından oluşurlar. Çatlaklar, trafik yükünün kaplama tabakası altında meydana getirdiği gerilmeleri, kaplama malzemesinin mukavemetini aştığı zaman oluşur. Bunun yanı sıra çatlaklar, araçların ani hızlanma ya da yavaşlamalarıyla ortaya çıkan yatay kuvvetleri sebebiyle de oluşabilirler. Bu etkilerden başka bazı dış etkenler, kendi kendilerine veya trafik yüküyle birlikte de çatlaklar oluşturabilir. Bunlar ;(Gençtürk 2011)

- Sıcaklık değişimleri, su absorpsiyonu yüksek agrega kullanımı, asfalttaki uçucu maddelerin buharlaşması,
- Nem ve sıcaklık değişimleri, alt tabakalarda kireç stabilizasyonu yapılırken ya da çimento ile kür olurken doğan hacim değişikliklerinin yansıması.

Ayrılma, ayrışma ve parçalanmalar

Ayrılma, ayrışma ve parçalanma tipi bozulmalar, agregaların trafik ve iklim etkisi ile kaplamadan koparak ayrılmasıyla ortaya çıkar. Bağlayıcının yerinde kalan agregadan ayrılması anlamına gelen “soyulma” bağlayıcının yine agregadan ayrılarak yüzeye çıkması demek olan “kasma” ve agreganın pürüzlülüğünü kaybetmesi anlamına gelen “cılalanma” da bu tip bozulmalar arasında incelenebilir.

Bitümlü bağlayıcı filmi ile agrega arasındaki adezif bağın zayıflaması sonucu oluşan soyulma her iklimde karşılaşılabilen problemlerden biri olarak ortaya çıkmakta ve çeşitli durumlarda çok önem kazanmaktadır. Soyulma birçok nedene bağlı olarak ortaya çıkabilir.

Bu tip bozulmaların genel nedenleri aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır.

- Bağlayıcının mekanik etki ile kopması

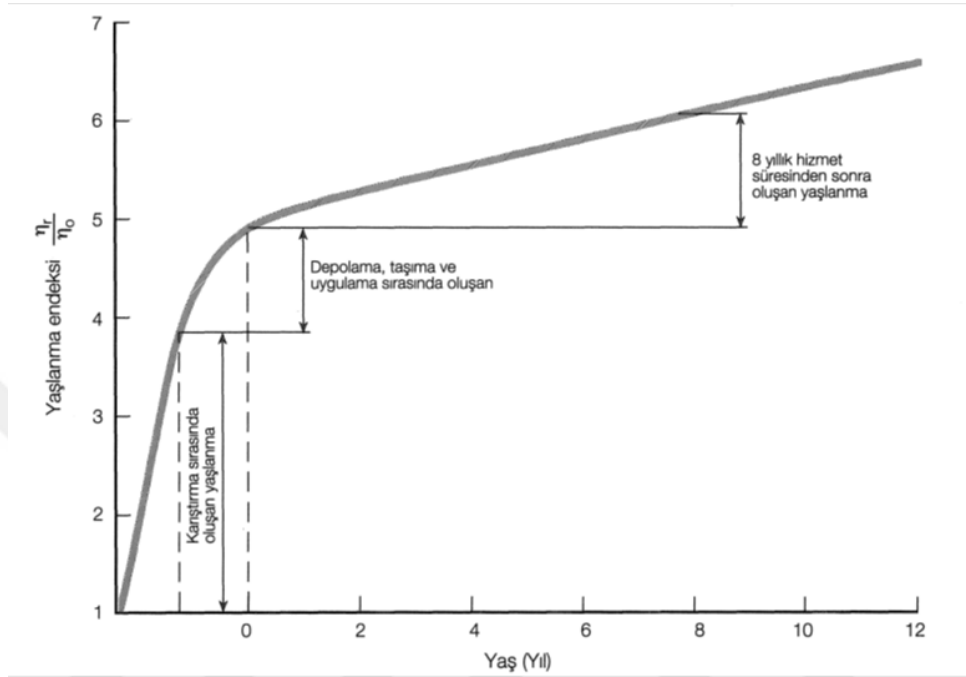
- Karışımın kötü kalitede olması, (örneğin düşük asfalt yüzdesi veya kirli agrega kullanılması vb.)
- Yüzey tabakasının ince olması
- Granüler temel ve alttemele tabandan kil yükselmesi,
- Drenajın yetersiz olması,
- Yapılan sıkıştırmanın yetersiz olması,
- Uygun olmayan hava koşullarında yapım,
- Asfaltın plentte aşırı derecede ısıtılması,
- Yapım sırasında segregasyon oluşması,
- Ayırışmayı kolaylaştıracak kuma oluşması,
- Kimyasal maddelerin (özellikle tuz ve yağların) etkisi,
- Yüzey tabakasının alt tabakaya iyi yapışmaması,
- Su ve kil etkisi ile soyulma.

Bitümlü Bağlayıcılarda Yaşlanma

Bitümlü sıcak karışımların stabilitesinden ve içsel sürtünme direncinden agrega sorumluyken kohezyonu ise bitüm aracılığıyla sağlanmaktadır. Ayrıca bitüm agrega danelerini birbirine kenetleyerek trafik yükleri altında dağılmasını önlemekte, oluşturdukları düzgün yüzeyler aracılığıyla konforlu bir sürüş sağlamakta, kohezyon ve stabilitenin gelişmesini sağlamakta, karışımda agregalar arasındaki boşluklarını doldurarak geçirimsiz bir tabaka oluşmasını sağlamaktadır. Bağlayıcı olarak bitüm içeren karışımlarda, bitüm ağırlıkça maksimum % 5-7 ve hacimce maksimum % 13-15 gibi düşük oranlarda kullanılsa da esnek kaplamalarda çok önemli bir yer tutmaktadır (Tunç 2004).

Bitümlü karışımların servis ömrü boyunca devamlı maruz kaldığı trafik hacmindeki ve dingil yüklerindeki sürekli devam eden artışlar, yollarda tekerlek izi oluşumu, üretim sırasındaki yanlışlıklar ve iklim koşulları, düşük sıcaklık çatlakları ve yorulma çatlakları gibi bozulmalara neden olmakta ve yolun tahmin edilen ömrünü ve konfor standardını düşürmektedir. Bitümlü bağlayıcıların performansını doğrudan etkileyen başlıca özelliği olan dayanıklılığı bağlayıcının sertleşmeye karşı gösterdiği direnç olarak da söylenebilir. Bitümlü bağlayıcının yukarıda da bahsedilen nedenlerden dolayı sertleşmesi ve kırılgan hale gelmesine “yaşlanma” ya da “zamana bağlı yaşlanma” denilmektedir (Bell et al. 1992). Bitüm zerinde yapılan çalışmalar yaşlanmanın iki aşamada gerçekleştiğini göstermektedir. Bu aşamalardan biri bitümün hazırlanma aşamasıdır. Bu aşamada üretim tesisinde bitüm, sıcak agregaya katılır ve karışım belirli bir süre yüksek sıcaklıkta kalır ve bitümde çok hızlı bir oksidasyon reaksiyonu

meydana gelir. Diğer bir aşama ise taşıma ve uygulamadır. Bu esnada da karışım sıcaklığı maruz kalmaktadır. Bu durumlar literatürde “kısa dönem yaşlanma” olarak tanımlanır. Oksidasyon sertleşmesi, su ve hava faktörleriyle birlikte üstyapının hizmet ömrü boyunca devam eder bu da “uzun dönem yaşlanma” olarak tanımlanır (Öztürk ve Çubuk 2004)



Şekil 4. Bitümün zaman içerisinde yaşlanması (Lav 2004)

Bitümlerin yaşlanma nedenleri

Oksidasyon: Bitümün zaman içinde hidrokarbon yapısındaki karbonların oksijenle birleşerek oksitlenmesi neticesinde bitümün moleküler ağırlığının yükselmesine sebep olarak bitümün viskozluğu ve katılığının yükselmesidir.

Uçucu madde kaybı: Bitümün yapısında çok az miktarda da olsa var olan uçucu maddelerin zamanla ya da ısı etkisiyle ayrılması bitümün sertleşmesine neden olmaktadır.

Tiksotropi: Bitüm, düşük sıcaklıklarda sabit bir şekilde bekletildiğinde bir rijitlik kazanmaktadır fakat bunun sebebi bitümlü bağlayıcının içindeki uçucu maddelerin buharlaşması ya da sıcaklığın değişmesi değil, bitümün bir kolloidal yapıdan meydana gelmesidir. Bu yapının etkisiyle bitüm belli bir süre durgunluk yaşadktan sonra, soğukta, sünger şekline benzeyen, ağ biçiminde üç ekseninde gerilmiş ancak elektronik mikroskopla gözlemlenebilecek bir yapı oluşturmaktadır. Bu yapı zaman içerisinde güçlenerek, bitüme, dış güçler karşısında, elastik malzemelerinki gibi bir rijitlik kazandırmakta, bu rijitlik mekanik bir sarsıntı sonucunda ortadan kalkmaktadır. Tekrar aynı rijitliğin sağlanması için bitümlü bağlayıcıyı bir süre bekletmek gerekmektedir.

Sıcaklığın artması da bitümlü bağlayıcının tiksotropiye dayalı rijitliği üzerinde mekanik bir sarsıntıya benzeyen etkiler meydana getirmektedir. Zira sıcaklık artışıyla bitümün misellerden meydana gelen rijitlik dokusu bozulmaktadır dahası miseller birbirinden kopmaya başlamakta bunun neticesinde ise bitümlü bağlayıcı rijitliğini kaybetmektedir. Tiksotropi, kolloidal eriyiğin termik ve mekanik etkilerle rijitliğini kaybetmesi ve diğer fiziki şartlarının değişmemesi şartıyla belirli bir durgunluk süresi neticesinde rijitliğini tekrar kazanmasıdır.

Polimerleşme: Bitümün hidrokarbon yapısının süreç içerisinde başkalaşıma uğrayarak sertleşmesidir.

Parçalanma: Bitümün içeriğindeki yağlı ve mumlu bölümlerin yumuşama periyotları esnasında agrega vasıtasıyla absorbe edilmesi neticesinde oluşan sertleşmedir.

Sineris: Bitümün yağlı bölümlerinin ısı ve zaman faktörlerinin etkisi altında asfalttan ayrılarak sertleşmesidir (Tunç 2004).

Bitümlü Bağlayıcıların Katkı Malzemesi Kullanılarak Modifiye Edilmesi

Günümüzde her ne kadar yol üstyapılarının büyük bir kısmında geleneksel bitümlü malzemeler arzu edilen performansı sağlıyor olsa da yollar ile alakalı talepler her geçen yıl artmaya devam ediyor. Bunun yanında her geçen gün yola etkiyen dingil yükü de artan ticari araç sayısı ile birlikte artış göstermektedir. Bir karayolu mühendisinin artan bu sorunlarla baş edebilmesi için günümüzde denenmiş çok geniş bir modifiye bitüm yelpazesi vardır.

İyi bir temel tasarım, düzenli bir yapım aşaması ile zamanında gerçekleştirilen bakım, esnek üstyapıların, yalnızca artan talepleri karşılamasını değil aynı zamanda bitümlü kaplamalar ile eşanlamlı hale gelmiş olan konfor ve güvenlik konusunda yüksek standartlar sağlamasını mümkün kılmaktadır. Diğer yandan, yolların belirli kısımları diğer kısımlarına kıyasla çok daha fazla gerilme altında kalmaktadır. Dolayısıyla tasarım ömrü boyunca bütün uzunluğun memnun edici bir performans göstermesi istendiğinde, bu alanlara özel bir önem verilmelidir.

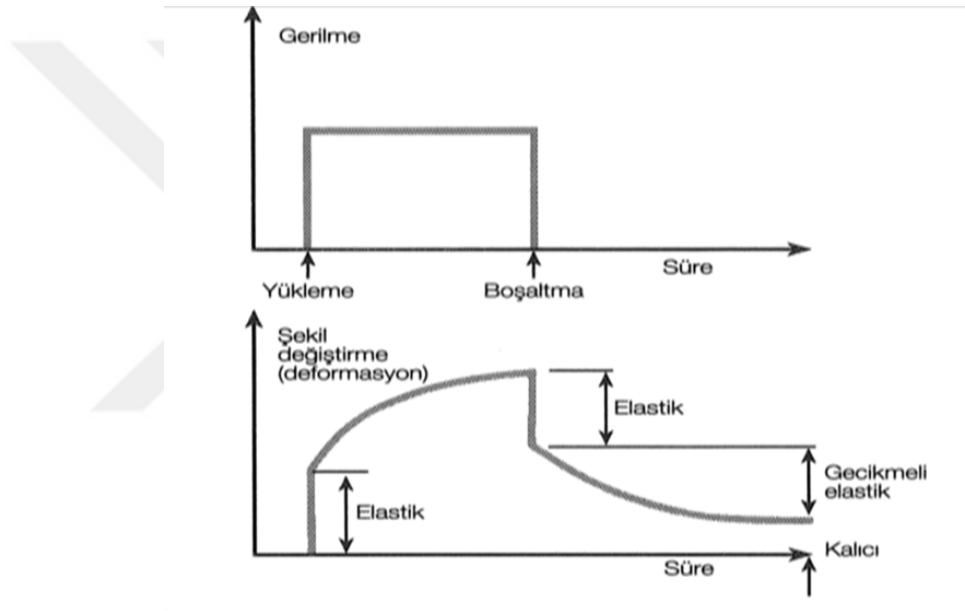
Örneğin, köprü yüzeyleri gibi farklı alanlarda özel maddelerin kullanılması gerektiğinin bilincinde olunmasına karşın, genellikle diğer kritik alanlara yapım ve bakım sırasında yeteri kadar özen gösterilmemektedir. Kısa zaman aralıklarında "kara nokta"larda yani sürekli bozulan bölgelerde tekrarlı çalışmalar gerçekleştirmek yerine, belirli bir zamanda tüm uzunluğun bakımı ve güçlendirilmesi açık şekilde bir fayda sağlamaktadır.

Modifiye bitümlerin kullanımı "kara nokta"larda gereken bakım sıklığının seyrekleştirilmesini mümkün kılmakla birlikte, zor alanlarda yapılacak bakım çalışmaları

arasında çok daha uzun bir hizmet ömrü sağlamaktadır. Modifiye bitümlerden en ekonomik şekilde yararlanmak için, bunlar, yüksek kaliteli agregalarla birlikte kullanılmalıdır. Böylelikle poroz asfalt kaplamalar gibi özel uygulamalarda ya da yorulma ve deformasyona yüksek direnç gerektiren alanlarda en optimum fayda sağlanacaktır.(Lav 2004)

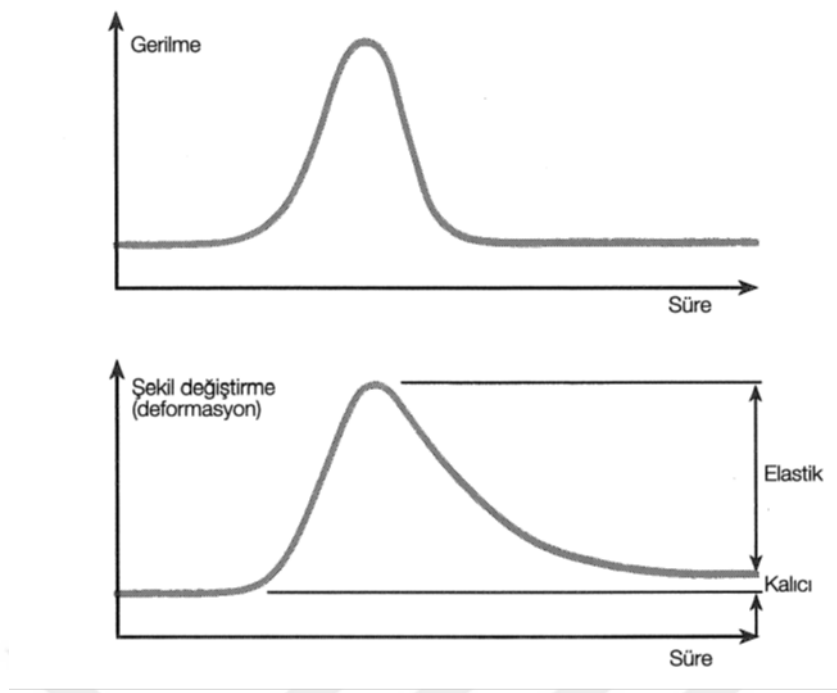
Modifierlerin (katkıların) bitümlü karışımlardaki rolü

Bitüm, tüm bitümlü karışımların visko-elastik karakteristiklerinden sorumlu olduğu için, üstyapının performansı üzerinde önemli bir rolü vardır. Kalıcı deformasyona ve çatlamaya karşı direnç tipik örneklerdir. Genel olarak, bitümlü bir malzemede viskoz akışa atfedilen geri dönmeyen deformasyon (şekil değiştirme), hem sıcaklık hem de yükleme zamanı ile birlikte artar. Şekil 5 ve Şekil 6'da bunların örnekleri görülmektedir.



Şekil 5. Bitümün statik yükler karşısındaki davranışı (Read ve Whiteoak 2003)

Şekil 5 de görüldüğü gibi uygulanan yüklemeden kaynaklanan şekil değiştirme, anlık bir elastik tepki şeklinde olmakta ve ardından yük ortadan kaldırılana dek kademeli bir artış gözlenmektedir. Deformasyonun zamanla değişimi malzemenin viskoz davranışına bağlıdır. Yük kaldırıldığında, elastik deformasyon anında geriye çekilmekte, zaman geçtikçe de bir miktar daha toparlanma meydana gelmektedir. Bu durum, "gecikmiş elastisite" olarak adlandırılmaktadır. Sonunda, geri kazanılamayan kalıcı bir deformasyon kalmakta olup, bu doğrudan viskoz davranışın bir özelliğidir.



Şekil 6. Bitümün dinamik yükler karşısındaki davranışı (Read ve Whiteoak 2003)

Şekil 6’da bitümün hareketli dingil yüklerine karşı davranışı görülmektedir. Deformasyon - zaman grafiğine bakıldığında yük etkisi öncesi ve sonrası deformasyon değerleri her ne kadar aynıymış gibi algılansa da çok az miktarlarda da olsa kalıcı olarak deformasyonlar meydana gelmektedir. Normalde yalnızca bir tekerlek yükü için tanımlanan bu deformasyonlar milyonlarca tekerlek yükü tekrür ettiğinde kaplama yapısında büyük bozulmalar olacaktır. (Lav 2004)

Asfalt ve asfalt gibi diğer yol kaplamalarının da yalıtım ve yalıtım örtü malzemelerinin performans yönünden üstün nitelikli, düşük maliyetli ve bakım onarım gereksiniminin az olması istenmektedir. Esnek üstyapı kaplamalarının kendilerinden beklenen performansı yerine getirebilmeleri için;(Anonim 2020)

- Kalıcı deformasyonlar
- Yorulma çatlakları
- Düşük sıcaklık çatlakları
- Soyulma
- Düşük durabilite

vb önemli bozulma türlerinin olabildiğince azaltılması sağlanmalıdır. Buna bağlı olarak, bitümlerin özelliklerini iyileştirmek ve hem bağlayıcı maddenin hem de karışımın performansını arttırmak amacıyla modifiye edici katkıları belirli oran ve şartlar çerçevesinde ya direkt bitüm içerisine ya da tesiste karışım içine katılır.

Modifiye edici olarak günümüzde en çok polimerler kullanılmaktadır. Katkı malzemesi olarak kullanılan polimerlere aşağıda örnekler verilmiştir;

Elastomerler (SBS, lateks vb.),
Plastomerler (EVA, polietilen vb.),
Termosetting polimerler (epoksi reçineleri),
Poliüretan reçineleri.

Bitümlü Bağlayıcıların Modifiye Edilme Sebepleri

Genel olarak, bitümlü bağlayıcının modifiye edilme sebeplerini maddeler halinde şöyle sıralamak mümkündür: (Anonim 2020)

- Düşük sıcaklıklar için daha yumuşak karışımlar elde etmek ve çatlakları azaltmak.
- Yüksek sıcaklıklar için daha sert karışımlar elde etmek ve tekerlek izinde oturmayı azaltmak.
- Yapım sıcaklıklarında viskoziteyi düşürmek.
- Sıkışma ve işlenebilirliği iyileştirmek.
- Karışım dayanımını ve stabilitesini artırmak.
- Karışımın aşınma dayanımını iyileştirmek ve agrega kopmasını azaltmak.
- Kaplamanın düşük sıcaklıktaki çatlaklarını azaltmak.
- Karışımın yorulma dayanımını iyileştirmek.
- Marjinal asfalt çimentolarının kalitesini yükseltmek.
- Yaşlanmış asfalt bağlayıcıyı tekrar gençleştirmek.
- Marjinal agregaların kullanımı sağlamak.
- Asfalt bağlayıcının servis ömrünü uzatmak.
- Agrega üzerinde daha kalın asfalt filmi oluşturmak.
- Yapışmayı iyileştirmek ve asfalt çimentosunun agrega yüzeyinden soyulmasını azaltmak.
- Kusmayı azaltmak.
- Geliştirilmiş çatlak dolgusu sağlamak.
- Yakıt dökütülerine karşı dayanım artışı sağlamak.
- Yaşlanmaya ya da oksidasyona karşı dayanım artırmak.
- Kaplama tabakalarının kalınlığı azaltmak.
- Kaplamanın ömür-döngü maliyeti azaltmak.
- Kaplamaların tüm performansını geliştirmek

Modifiye edici katkı malzemesinin bitümlü bağlayıcıya etki edebilmesi ve hem pratik hem de ekonomik uygulaması için aşağıda sıralanan şartlar sağlanmalıdır.(Lav 2004)

- Kolay bir şekilde elde edilebilir olması
- Bitümlü bağlayıcı ile karıştırma sıcaklıklarında bozulmaması,
- Bitümlü bağlayıcı ile homojen bir karışım sağlaması,
- Karıştırma ve serme sıcaklıklarında bitümü fazla viskoz, serme, sıkıştırma ve hizmet sıcaklıklarında ise çok rijit veya kırılgan hale getirmemesi
- Yüksek hizmet sıcaklıklarında akmaya karşı direnci iyileştirmesi.
- Ekonomik olması

Modifiye edici malzemelerin bitümlü bağlayıcı ile karıştırılmasının ardından da aşağıda sıralanan özelliklere sahip olması arzu edilir:

- Depolama, uygulama ve hizmet aşamalarında geliştirilmiş özelliklerini korumak;
- Geleneksel ekipmanlar ile işlenebilme;
- Depolama, uygulama ve hizmet aşamalarında fiziksel ve kimyasal özelliklerini korumak;
- Normal uygulama sıcaklıklarında kaplama veya püskürtme viskozitesini sağlamak

Modifikasyon işlemi genel olarak iki türlü yapılabilmektedir. Bunlar:

1. Katkı malzemesi bitüme eklenerek, “modifiye bitüm” elde edilir.
2. Katkı malzemesi, asfalt plentinde doğrudan karışıma eklenerek, “modifiye karışım” elde edilir.

Bitümün modifikasyonunda, modifiye bitüm çeşitli standart test yöntemleri uygulanarak bitüm özelliklerindeki değişmelerin tespit edilmesi mümkün olmaktadır. Böylece, modifiye bitümün özelliklerinin belirlenmesi ve değerlendirmesi yapılabilmektedir. Fakat, bitümün modifiye edilmesi yönteminde, ilave ekipmanlar gerekmede, hazırlanan modifiye bitümün depolanması, taşınması gibi sorunlar ortaya çıkmaktadır. (Erkuş 2017)

Modifiye Bitüm ve Kullanılan Katkı Maddeleri Hakkında Yapılan Çalışmalar

Günümüzde bitümün modifiye edilmesiyle yol üst yapılarının davranışlarının iyileştirilmesi amaçlanmaktadır. Son zamanlarda artan modifiye bitüm çalışmaları, farklı katkı maddeleri ile yapılan modifiye işleminde bu katkıların bitüme kazandırdığı özellikler hakkında bilgi edinmeye yoğunlaşmıştır. Bu kapsamda birçok katkı maddesi kullanılarak modifiye bitüm yapılmış ve sonuçları değerlendirilmiştir. Bu çalışmalardan bazıları aşağıda örnek olarak özet şeklinde sunulmuştur.

Yaygın olarak kullanılan katkı maddeleri ile yapılan çalışmalar

(2011) Arslan, D., Gürü, M., ve Çubuk, M.K. çalışmalarında; 50/70 penetrasyon dereceli bitüm ile organik esaslı sentetik çinkofosfat bileşiği (OEÇFB) kullanarak bitümü modifiye etmişlerdir. Burada bitümün reolojik özelliklerinin iyileştirilmesi amaçlanmıştır. OEÇFB, bitüme kütlece %1, %2, %3, %5, %10 oranlarında eklenmiş ve viskozite deneylerinin sonuçları değerlendirilerek bitüm modifikasyonunda kullanılacak optimum OEÇFB oranı %3 olarak belirlemişlerdir.

Sonuç olarak; QEÇFB katkı malzemesiyle yapılan bitüm modifikasyonunda, bitümlü bağlayıcının düşük sıcaklıktaki reolojik özelliklerinin iyileştiğini gözlemlenmişlerdir. Ayrıca, %3'lük OEÇFB katkı oranı ile modifiye edilen bitümlü bağlayıcı ile karışım yapıldığında Marshall stabilitesinin %6,1 oranında arttığı, soyulma direncinin %30'dan %95'e yükseldiğini gözlemlemişlerdir.

(2012) Kök, B.V., Yılmaz, M. ve Kuloğlu, N. çalışmalarında; Şırnak (Silopi) bölgesinden temin edilen asfaltit, B160/220 bitümüne kütlece sırasıyla %2, %4, %6 ve %8 oranlarında katılmış. Saf bitüm ve asfaltit modifiyeli bitümlerin mekanik özellikleri incelenerek sonuçları tartışılmış.

Sonuç olarak; Asfaltit katkısı ile viskozite değerinin ve kompleks modülünün arttığı, penetrasyonun azaldığı, yumuşama noktası ve faz açısı değerlerinde ise önemli değişimler olmadığı görülmüş. Marshall numuneleri hazırlanıp test yapılmış ve sonuç olarak bitümün asfaltit ile modifiye edilmesiyle kalıcı Marshall stabilitesinde, indirekt çekme değerinde, 15°C, 25°C ve 35°C sıcaklıklardaki rijitlik modülü ve yorulma ömründe artışlar olduğu görülmüş. Kısacası, bitüme belli oranlarda asfaltit katılmasının bitümlü sıcak karışımların neme karşı direncini ve mekanik özelliklerini etkili şekilde iyileştirebileceği görülmüş. Test edilen karışımlarda optimum asfaltit katkı oranı %4 olarak belirlenmiş.

(2013) Özay, O., ve Arıkan Öztürk, E. çalışmalarında; MD243 SBS (Stiren-Bütadien-Stiren) ve TPS (TafPack-Super) katkılarını kullanılarak 50/70 penetrasyonlu bitümü modifiye etmişlerdir. Yapılan bu modifiye bitümler ile hazırlanan Poroz Asfalt karışımlarına; tekerlek izinde oturma, indirekt çekme mukavemeti, permeabilite, bitüm süzülme, parça kaybı (cantabro), soyulma ve tekrarlı yükler altında yorulmaya karşı dayanım deneyleri uygulanarak her iki karışımın performansları da ayrı ayrı incelenip karşılaştırma yapmışlardır.

Sonuç olarak; TPS katkısı ile hazırlanan karışımın bitüm süzülme değeri MD 243 katkısı ile hazırlanan karışımın bitüm süzülme değerine, göre daha kötü sonuç vermiş ve her iki katkı ile hazırlanan karışımın da donma çözünme etkilerine karşı dayanıklı olduğu görülmüş.

Donma çözünme etkilerine TPS katkısı ile hazırlanan karışımın daha dayanıklı olduğu görülmüş. Yapılan diğer deneylerin sonuçlarına göre standartlara uygun oldukları ve genel olarak bitümün yapısını her iki malzemenin de iyileştirdiği gözlemlenmiştir.

(2017) Shi, X., Cai, L., Xu, W., Fan, J. ve Wang, X. çalışmalarında; on altı asfaltın farklı nano-silika içeriğine sahip reolojik özellikleri ve Qingchuan kaya asfaltı tek değişkenli analiz ve varyans analizi ile analiz edilmiştir. Bu analizler sonucu modifiye asfalta bu iki malzemenin ne tür etkileri olduğu saptanmaya çalışılmış. Bu çalışmada, Karamay'dan AC-60/70 asfaltının bileşimi QC kaya asfalt ve nano-silika(bu çalışmada nano-silis hazır halde kullanılmış) ile modifiye edilmiştir. Daha sonra şu testler uygulanarak sonuçlar tartışılmış, dönel viskozite (RV) testi, dinamik kesme reometresi (DSR) testi, bükülme demeti reometre (BBR)(asfaltın düşük sıcaklıktaki çatlama duyarlılığı) testi ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) testi.

Sonuç olarak; aşağıdaki bilgiler elde edilmiştir.

- Yeni oluşan bileşik modifiye asfalt yüksek sıcaklıklarda az miktarda tatmin ediciyken düşük sıcaklıklarda kolayca çatlayabiliyor.
- QC kaya asfaltının döner vizkozite üzerindeki etkisinden ziyade asfaltın reolojik özellikleri üzerindeki etkisi daha önemlidir.
- Aynı parçalanma direncine ulaşmak için bileşik modifiye asfalt düşük sıcaklıklara QC kaya asfaltından daha iyi performans sağlar. Dahası nano-silika ile modifiye edilmiş asfalt ile karşılaştırıldığında bileşik modifiye asfalt daha yüksek maliyet performansı gösteriyor.
- DSR ve BBR testlerinin sonuçlarından, performans farklı kombinasyon dereceleri elde edilmiştir. En uygun olarak (6,1) yani %6 QC kaya asfalt %1 nano-silika karışımı.
- Bileşik modifiye asfalt yüksek sıcaklıktaki ve ağır yük taşımacılığının olduğu yerlerde daha uygundur. Ancak düşük sıcaklıktaki bölgeler için uygun değildir.(hava sıcaklığı -16 derece altında)

(2017) Demirkaya, Ö. ve Terzi, S. çalışmalarında; karbon lif katkılı asfalt karışımların davranışını incelemek için 3, 6 ve 12 mm uzunluklarında ve % 0.25, 0.50, 0.75, 1.00, 1.25, 1.50 oranlarında kırılmış karbon lifi ilave edilerek asfalt betonu karışımlar üretilmiş ve karbon lif katkısının asfalt betonu karışımının mekanik özelliklerini iyileştirilmesi ve stabilitesinin artırılması amaçlanmıştır.

Sonuç olarak; en iyi Marshall stabilitesini % 0.50 oranındaki 12 mm uzunluğundaki karbon lif modifiyeli asfalt karışımı vermiştir.

(2018)Yıldırım, Z.B., Karacasu, M. ve Okur, D.V. çalışmalarında; belli oranlarda atık lastik ve cam lif içeren modifiye bitümün asfalt betonunun performans özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu malzemeler ile modifiye edilen bitüm kullanılarak Marshall tasarımıyla numuneler elde edilmiştir ve sonuçları değerlendirilmiştir.

Sonuç olarak; modifiye edilmiş numunelerin Marshall dayanımlarının az bir miktarda azaldığı gözlenmiş fakat tüm numunelerin standart koşulları sağladığı gözlemlenmiştir.

(2018) GÖKALP, İ.,ÖZİNAL, Y. ve UZ, V.E. çalışmalarında; atık bitkisel yemeklik yağlar (ABYY)'lerin bertaraf etme yöntemlerine alternatif bir yaklaşımda bulunulmuş ve bitümde bir katkı maddesi olarak kullanılabilirliği ve bitüm özelliklerine olan etkisi araştırılmış. Bu çalışmada, 70/100 penetrasyonlu bitüm kullanılmış. Bitüm ağırlığınca % 2, 4, 6, 8 ve 10 oranında ABYY bitüme eklenmiş, homojen bir karışım elde edilmesi için standart bir metotla karıştırılmış. ABYY katkılı bitüm ve saf bitüm numunelerine, geleneksel bitüm testlerinin yanısıra iki farklı sıcaklıkta dönel viskozimetre testleri uygulanmış.

Sonuç olarak; ABYY katkısının bitüm özelliklerini belirgin bir şekilde değiştirdiği görülmüştür. Bitüme eklenen ABYY oranı arttıkça, penetrasyon değeri artmış buna bağlı olarak yumuşama noktası azalmış, parlama noktası, duktilite değerlerinde ve farklı sıcaklıklarda yapılan viskozite değerlerinde azalış olduğu gözlemlenmiş.

(2018) Alataş, T., Yılmaz, M., Kök, B.V., Çeloğlu, M.E., Akpolat, M., Erdoğan Yamaç, Ö. ve Yalçın, E. çalışmalarında; iki farklı boyutta (No.40 elek üstü ve altı) öğütülmüş araç lastiği (CR) ve öğütülmüş araç lastiğinin pirolizinden elde edilen karbon siyahı bitüm modifikasyonu için %5, %10 ve %15 oranlarında ilave edilmiş. Saf ve modifiye bağlayıcılar üzerinde penetrasyon, yumuşama noktası, viskozite ve dinamik kayma reometresi (DSR) deneyleri yapılmış. Ayrıca bağlayıcıların sıcaklığa karşı hassasiyetini belirlemeye yardımcı olan penetrasyon indeksi (PI) değerleri belirlenmiş.

Sonuç olarak; Penetrasyon, yumuşama noktası ve viskozite deneyleri sonucunda bitüm modifikasyonunda kullanılan CR miktarı arttıkça penetrasyon değerlerinin düzenli olarak azaldığı, yumuşama noktası ve viskozite değerlerinin düzenli olarak arttığı belirlenmiş. Bu durumda CR kullanımı bitümü serleştirmiştir. CR boyutunun ise bu üç deney üzerinde önemli bir etkisi olmadığı gözlemlenmiş. PI değerlerinden saf bitümlü bağlayıcıya kıyasla No.40 elek altı %5 CR kullanılan modifiye bitüm dışındaki tüm modifiye bitümlerin sıcaklığa karşı hassasiyetinin daha az olduğu belirlenmiş. DSR deneyleri sonucunda CR içeriği arttıkça bağlayıcıların tekerlek izine karşı dayanım parametrelerinin ve elastikiyetlerinin arttığı belirlenmiş. Öğütülmüş CR'nin pirolize tabi tutulmasından elde edilen karbon siyahının bitüm

modifikasyonunda kullanılması CR'nin etkinliğini azaltmış özellikle No.40 altı boyuttaki CR'nin karbon siyahı saf bitümün özelliklerini iyileştirme özelliği göstermemiştir.

(2018)Rasool,R., Hongru,Y., Hassan, A., Wang,S., ve Zang, H.; çalışmalarında yüksek SBS içerikli poroz asfaltın alan içi yaşlanma sürecini gözlemlemişler. Burada poroz asfalt karışımının çatlama direncini, yapışmasını, sürtünmesini ve dayanıklılığını artırmak; malzemelerin reolojik ve ısı özelliklerine göre yaşlanmanın ardındaki oluş mekanizmasını ve bunun yanında aralarındaki olası ilişkiyi araştırmak amaçlanmıştır.(6 ve 9 yıllık yollardan örnekler alınmış ve karşılaştırılmış.)

Sonuç olarak; SBS ile modifiye edilen asfaltın modifiye edilmeden önceki asfalta göre daha pozitif özellikler gösterdiği makalede sunulmaktadır. Yaşlanma sürecinin uzadığı ayrıca 6 ve 9 yıl sonra dahi çok iyi performanslar gösterdiği sunulmuş. Poroz asfaltın üst kısmı daha çok hava koşullarına maruz kaldığı için yaşlanma orda daha çabuk gözlenmektedir. Yaşlanma SBS nin bozulması, daha hafif bileşenlerin buharlaşması, asfaltın oksidasyonu ve yoğunlaşması ve bağlayıcılar üzerine etki yapar. Bu makalede normal asfalt daha çabuk bu bozunmaları yaşarken SBS modifiye asfalt daha geç yaşar.

(2018) A.I. Al-Hadidy; çalışmasında polipropilen modifiyeli yaşlandırılmış asfaltın mühendislik davranışı hakkında araştırma yapmış. Bu çalışma laboratuvar yaşlanmasının mühendislik özellikleri üzerindeki etkisini belirlemek için yapılmış.100 °C daki 48 ve 96 saat arasındaki iki yaşlanma seviyesi kullanılmış. Polipropilen ile modifiye edilmiş farklı asfalt betonu karışımları kullanılmış. Marshall stabilitesi, Marshall sertlik katsayısı, dolaylı çekme dayanımı, çekme dayanımı oranı, esneklik modülleri,100 C deki yaşlanma, çatlama indeksi gibi değerler analiz edilmiş.

Sonuç olarak; 48 ve 96 saat yaşlanma için pp (polipropilen) modifiyeli asfaltın normal karışım asfalta göre daha yüksek stabilite gösterdiği gözlemlenmiş. Stabilite için 96 saat yaşlanma 48 saatteki yaşlanmaya göre daha yüksek. Akış 2-4 mm arası. Havaboşluğu %3-5 arasında değişiyor. 96 saatte daha fazla. Rutting ve nem hasarına karşı daha dayanıklı. Kontrol karışımlarından daha uzun ömürlü. pp kullanımı esneklikte artışa sebep olmuş. Asfalt karışımlarının düşük sıcaklıkta çatlamlarına karşın direncini artırdığı gözlenmiş. (genelde 96 saatteki yaşlanan pp karışımı daha yüksek oranlar vermiş)

(2018) Jin, J., Xiao, T., Tan, Y., Zheng, J., Liu, R., Hui Wei, G.Q. ve Zhang, J.; çalışmalarında TiO2 direkli montmorillonite nanokompozitlerin egzoz katalitik kapasiteye sahip asfalt özellikleri üzerine etkisini araştırmışlar.Oksijen, ısı ve ultraviyole gibi sert faktörler asfaltın yaşlanmasına yol açar. Asfalt içerisindeki geçici bileşenler kaybolur ve oksidasyon reaksiyonları meydana gelir. Bu da dönüşümsüzdür. Asfalt servis ömrü azalır. Ayrıca büyüyen

araçların varlığı egzoz varlığını da büyütüyor. Bu salınan egzoz insan sağlığı için olumsuz sonuçlar doğurur. İşte bu makalede bu sorunların önüne geçilebilirliği tartışılmaktadır. Bilindiği gibi nano TiO₂ güneşten gelen zararlı etkilere karşı oldukça etkilidir. Bunun nano boyuta taşınıp montmorillonit ile birleştirilmesi oldukça faydalı olduğu düşünülmüş ve bu çalışma yapılmış. Çin’de Xinyang’dan elde edilen katyon değişim kapasitesi (CEC) 0.9 mmol / g olan sodyum montmorillonite kullanılmış. Tetraetil titanat, sodyum hidroksit konsantre nitrik asit, etanol ve asetik asit kullanılmış. Penetrasyon değeri 70/100 olan asfalt kullanılmış. Yüksek sıcaklıklarda reolojik özellikleri test edilmiş. Daha sonra ultraviyole yaşlanma testine tabi tutulmuş. Kendinde tasarlanmış bir cihaz kullanılarak egzoz içindeki NO, CO ve HC zararlı atıklarına karışım maruz bırakılarak test edilmiş.

Sonuç olarak; T/M modifiyeli asfalt normal TZ70 asfalt ile karşılaştırıldığında sıcaklığa karşı daha yüksek dayanım, egzoz karşısında daha az bozunma(zamanla bu bozulma oranı da azalıyor.), Ultraviyoleye maruz kalındığında daha geç yaşlanma ve daha az etkileşim gösterdiği görülmüştür.

(2017-2018) Cai, L., Shi, X. ve Xue, J.; çalışmalarında; Her ne kadar modifiye asfaltın maliyeti yüksek işlenmesi zor olsa da yapılan araştırmalar sonucu kaplama performansında görülen pozitif artışın tatmin edici olması SBS modifiyeli asfaltın yapımını tetiklediği görülmüştür. Bu çalışmada da nano silika/sbs ve kaya asfaltı içeren modifiye asfaltın laboratuvar ortamında incelenmesi ele alınmıştır. NS in geniş spesifik yüzey alanı nedeniyle asfaltta homojen dağılım elde etmek zordur. Bu yüzden bir bağlayıcı madde kullanılmıştır. Öncelikle modifiye edilmemiş asfalt, SBS, NS (nano-silika), RA(kaya asfalt) belli oranlarda sıcak bir kap içerisinde karıştırılmış. Daha sonra 170 derece sıcaklıkta 20 dakika muhafaza edilerek yüksek hızlı makaslama yöntemiyle 5000 dev/dak da 30 dakika karıştırılmış. Homojen bir karışım elde edinceye kadar karıştırılmış.2saat bekletilmiş. Modifiye asfalt yüksek sıcaklığa dayanırken düşük sıcaklıklarda kolayca çatlayabilir. SBS eklenmesi bu düşük sıcaklıktaki sorunu da azaltır. Daha sonra 8 farklı şekilde karışım hazırlanıp laboratuvar testlerine tabi tutulmuş.(penetrasyonu, hassaslığı, duktilitesi RTFOT deneyi vb.) Daha sonra diğer deneyler yapılarak sonuçlar gözlenmiş.

Sonuç olarak; normal modifiye edilmemiş asfalt ve NS/RA/SBS ile modifiye edilmiş asfalt arasında belirgin farklar görülmüştür. Aslında en çok pozitif etkileyen SBS varlığıdır. Mesela 8 çeşit MARSHALL örneği sonuçları incelendiğinde en iyi özelliklerin SBS varlığının fazla olduğu örneklerde gözlemlendiğini görebiliriz.

Genel olarak;

- Nano-silika, kaya asfalt ve SBS ile modifiye edilmiş asfalt önerilmektedir.

- Nano-silika, kaya asfalt ve SBS ilavesiyle performans iyileştirmeleri sağlanmıştır.
- % 1 Nano-silika /% 6 kaya asfalt /% 3 SBS modifiye asfalt karışımı,% 5 SBS modifiye asfalt karışımından daha yüksek maliyet performansına sahiptir. Sonuçlarına varılmıştır.

(2018)Sönmez, İ., Deniz, M.T., Tayfur, S., Özen, H., Yıldırım, S.A. ve Eren, B.K. çalışmalarında; bitüm ve bitümlü sıcak karışımların (BSK) modifiye edilmesiyle üstyapıların tekerlek izi oluşumu, sökülme, ondülasyon düşük sıcaklık çatlakları vb. olumsuzluklara karşı dirençli olmalarını amaçlamışlardır. Dünyada yaygın olarak kullanılan plastomer, elastomer, doğal hidrokarbonlar, Trinidad göl asfaltı ve selülozik elyaf esaslı katkı maddelerinin BSK performansı üzerindeki etkileri incelenmiş ve karşılaştırma yapılmıştır. Bu amaçla deneysel çalışmalar yapılmış ve bu çalışmalar sonucu elde edilen verilere göre maddelerinin bitümlü sıcak karışımlara (BSK) olumlu etkileri ve her birinin diğerlerine karşı üstün yönleri ortaya konmuştur.

Sonuç olarak;

1. Marshall Stabilesi açısından karışımların stabilite değerleri birbirlerine göre farklılıklar göstermiş olup, tüm karışımların stabilite değerleri şartnamedeki sınır değerleri üzerinde olduğu belirlenmiştir.
2. Dolaylı çekme mukavemetinde, katkılı karışımlar 25 °C’de geleneksel karışıma nazaran büyük üstünlük göstermemektedir. Fakat 40 °C’de Viatop dışında kalan katkı maddelerinin etkisinin olumlu olduğu açıkça görülmüştür.
3. Dolaylı çekme deneylerinde karışımların tamamının rijit sınırdan kaldığını görmüşlerdir. Ancak 40 °C’de Gilsonite, Vestoplast ve Tnac katkılı karışımların rijit tarafta diğer karışımların ise uygun bölgede kaldığı görülmüştür.
4. Tekerlek izi oluşumunda bütün Modifiye katkılı karışımların geleneksel karışımlara göre üstün performans sağladığı görülmüştür.
5. Katkı maddelerinin BSK üzerinde gösterdikleri performans, BSK’nın maruz kaldığı yükler, çevre ve diğer olumsuz etkiler karşısında farklılık göstermekle birlikte, her bir katkı maddesinin birden fazla olumlu etkisi olduğu belirlenmiştir.
6. Tekerlek izi oluşumuna karşı gösterilen direnç için en iyi beş katkı malzemesi Olexobit, Elvaloy, Pr Plast, Gilsonite ve Tnac olarak gözlemlenmiştir.
7. Modifiye katkı maddeleri farklı özellikler göstermekle birlikte, Gilsonite, Elvaloy ve Olexobit katkılarının genel bir üstünlüğünün varlığı görülmüştür.

(2018)Terzi, S. ve Alalı, F. çalışmalarında; Bitümlü Sıcak Karışım (BSK) numunelerinin içerisine farklı oranlarda geri dönüştürülmüş asfalt betonu malzemesi (RAP)

eklenmiş ardından stabilite, akma ve indirket çekme (ITS) dayanımları incelenmiştir. Öncelikle aşınma tabakası için optimum bitüm miktarı Marshall metodu uygulanarak hesaplanmış ve bu optimum bitüm içeriğinde hazırlanan asfalt betonu numunelerine %5-%50 oranlarında RAP eklenmiş. Bununla birlikte RAP eklenmemiş asfalt betonu numunelerine de deneyler uygulanmış ve elde edilen sonuçlar birbirleriyle karşılaştırılmış.

Sonuç olarak; yapılan deney sonuçları yardımıyla RAP eklenmiş BSK numunelerinin stabilite ve akma ve İndirket Çekme Deneyi (ITS) yönünden Karayolları Teknik Şartnamesindeki sınırlar içerisinde aşınma tabakasında kullanılabilir olduğunu gözlemlemişlerdir.

(2019) Oldham, D.J., Rajib, A. I., Onochie, A., Fini, E. H.; çalışmalarında biyolojik olarak modifiye edilmiş geri dönüşümlü asfalt zonları hakkında araştırma yapmışlar. Burada modifiye RAS(geri dönüşümlü asfalt zonları) ın biyo modifiye zonu olarak adlandırılan BMS ye maruz bırakılarak dayanıklılığını ölçülmüş ve hem şiddetli oksidasyon hem de sıfırın altındaki şartlarda davranışı incelenmiş. Bu gözlemler sonucu RAS ın olumlu yönde sonuç verdiği görülmüş. Kullanılan asfalt zonları iki gruptur biri üretim sırasında veya sonrasında kusurlu olanlar (MWSS) diğeri eskimiş çatı kiremitleri bunlara yırtma veya yırtık hurda zonları denir(TOSS).Bu çalışmada modifiye katkı malzemesi olarak TOSS kullanılmış.

Sonuç olarak; BMS li geri dönüşümlü asfalt normal RAS a göre daha olumlu sonuçlar doğurmuş. Daha kolay uygulanabilirlik, daha düşük viskozite, daha dayanıklı, fiziksel sertleşme daha geç, çarprazlama modülü ve sıklığının arttığı görülmüş. Kırılma enerjisini yükseltmiş ve kırılmayı zorlaştırdığı görülmüş. Yorulma direncinin arttığı görülmüş. BMS nin yaşlanma öncesi ve sonrası değerleri normal RAS a göre daha iyi olduğu belirtilmiş. Bu çalışma geri dönüşümlü asfaltlar dayanıklılığının artması ve uygulama performansını kolaylaştırmak için biyo modifiye edilerek kullanılabileceğinin bir göstergesi olmuş.

(2018-2019)Dong, Z., Zhou, T., Luan, H.,Williams, R.C.,Wang P. ve Leng, Z. çalışmalarında; Petrol bazlı asfalt yerine biyolojik atıktan elde edilen bio-asfalt kullanılması petrole olan bağımlılığı azaltır ve daha çevre dostu ve sürdürülebilir bir kalkınma sağlar. Bu çalışma da birleşik bio-asfaltın (BBA) birleşik modifikasyon mekanizmasını kırıntı kauçuğu (CR) ve SBS yi birleştirerek kapsamlı bir şekilde inceleniyor. Bu inceleme sonucunda bu karışımın çevre dostu olup olmayışı gözlemleniyor. Malzeme olarak PEN 90 asfaltı ve orijinal bio-asfalt(OB) seçilmiş. OB ile harmanlanmış PEN 90 ilk önce harmanlanmış bio-asfalt (BBA) ardından BBA, SBS veya yalnızca CR veya çeşitli kombinasyonlar şeklinde karıştırılmış. Değişiklik süreci üç faza ayrılır: (a) şişme fazı, polimerler hafif bileşenlerin asfaltta emilmesi; (b) taşıma makası faz, şişen polimerler, ince parçacıklara bölünmüş; (C) gelişim aşamasında,

asfalt ve polimer karışımı karıştırılmış. Daha sonra şu testler sırasıyla yapılmış; kimyasal analiz için; Fourier Dönüşümü Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR) testi, morfolojik analiz için; Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM) testi, reolojik analiz için; Çoklu Gerilme Sürünme ve Kurtarma Testi (MSCR), Frekans Tarama Testi (FS), Bükme Kirişli Reometre Testi (BBR), En son da han eğrileri ile uyumluluk tahmini yapılmış.

Sonuç olarak; bileşik modifikasyon bio-asfaltın kapsamlı performansını iyileştirmek için ve atıkların yeniden kullanılması için gerçekten etkili ve güzel bir yöntemdir. Ancak bioasfalt kökeninin çeşitliliği nedeniyle bu bulguların uygulanabilirliği zor olabilir aynı zamanda bu bio-asfaltın geniş ölçekte uygulanmasındaki en büyük zorluk olarak görülür. Bu nedenle bu konuda geniş çaplı çalışmalar yapılmaya devam ediyor. Ayrıca bio-asfaltın asfalt talebine göre çevresel şartları ve ulaşım alanındaki gelişmeler büyük ölçekte ele alınması gerekir.

(2019) Gökalp, İ., Çetin, H.M., Özinal, Y., Gündoğan, H. ve Uz, V.E. çalışmalarında; araştırmacılar ve sektör temsilcileri için bir bitüm modifikasyonuna etki eden faktörler hakkında farkındalık oluşturmak amacıyla bitüm-polimer modifikasyonuna etki eden faktörler ile ilgili bir literatür araştırması yapmışlardır. Bu amaç doğrultusunda, bitüm ve karakteristik özellikleri, bitüm modifikasyonu ve amaçları anlaşılır olarak yapılmış. Bitüm modifikasyonunda en fazla kullanılan katkı malzemesi olan polimerlere yer verilmiş ve PMB ve özelliklerine etki eden faktörler günümüzde ve önceki yıllarda yapılan bilimsel çalışmalar yardımıyla detaylı bir şekilde incelenmiş.

Sonuç olarak; Bu çalışma ile bir bitüm modifikasyonunda, Bitümün türü ve kaynağının, polimer türünün, miktarının ve kimyasal yapısının ve PMB üretiminde seçilen sıcaklık, hız ve süre gibi üretim koşullarının, PMB arzu edilen özelliklere sahip olmasında oldukça önemli olduğu ortaya konulmuştur. Bir bitümün doğru bir polimer ile uygun sıcaklık, karıştırma hızı ve süresi gibi faktörlerde modifiye edilmesi yol üstyapısı için büyük öneme sahip olduğu görülmektedir. Çünkü bu faktörler dikkate alınmadan üretilen polimer modifiye bitüm ve kullanıldığı yol üstyapısının kullanım ömrü uzun olamayacak ve ilgili kurumlara önemli bir ekonomik kayıp olarak geri dönecektir.

(2020) Feng, Z., Cai, F., Yao, D. ve Li, X. çalışmalarında; FTIR analizine dayalı ultraviyole emici(UVA) ve SBS ile modifiye edilmiş bitümün yaşlanma özellikleri hakkında araştırma yapmışlar. Katkı malzemesi olarak üç çeşit UVA ve iki tip SBS kullanmışlar. Numunelerin termal oksidatif ve ultraviyole (UV) yaşlanması sırasıyla ince film fırın testi (TFOT) ve UV yaşlandırma testi ile hızlandırılmış. Farklı UVA'ların ve SBS ile modifiye edilmiş bitümün yaşlanma özellikleri üzerindeki etkileri, Fourier dönüşümü kızılötesi

spektroskopisi (FTIR) yardımıyla değerlendirilmiş. Ardından, FTIR analizinden elde edilen sonuçları doğrulamak ve UVA / SMB'lerin kimyasal yapısı ile makro performansı arasındaki ilişkiyi kurmak için dinamik kesme reometresi (DSR) testi kullanılmış.

Sonuç olarak; üç UVA'nın ve SBS ile modifiye edilmiş bitümün yaşlanma özellikleri üzerindeki etkisinin sadece UVA tipine bağlı olmadığını, aynı zamanda SBS polimerinin yapısıyla da ilgili olduğu görülmüş. Katkı malzemelerinin yaşlanma direncinde bariz bir gelişme sergilediği görülmüş. Hem termal oksidatif hem de UV yaşlanmaya karşı direnci yükseldiği görülmüş.

(2020)Joohari, I.B. ve Giustozzi, F. çalışmalarında; hibrit polimer modifiye bitüm (PMB) üretmek için saf polimerlerin yerine geri dönüştürülmüş doğrusal düşük yoğunluklu polietilenin (RLLDPE) potansiyel kullanımı üzerine bir çalışma sunmaktadırlar. Bu tür bir kullanımın fizibilitesini araştırmak için hibrit PMB'nin termal, kimyasal ve reolojik özelliklerine odaklanan deneysel testler yapılmış. Hibrit PMB,% 3.5 stiren bütadien stiren (SBS) ve% 2 plastomerlerden oluşmaktadır; Kimyasal çapraz bağlama etkisini araştırmak için kükürt ilavesi de değerlendirilmiş. Ticari plastomerler, yani etilen-vinil asetat (EVA), düşük yoğunluklu polietilen (LDPE) ve doğrusal düşük yoğunluklu polietilen (LLDPE), RLLDPE ile karşılaştırma olarak test edildi; hepsi hibrit formlarında SBS ile birleştirilmiş.

Sonuç olarak; , geri dönüştürülmüş PE polimerlerinin, özellikle de RLLDPE'nin, SBS ile kombinasyonu yoluyla hibrit PMB üretiminde potansiyel kullanımının, üstün kimyasal ve reolojik özelliklere yol açabileceğini göstermektedir. Ancak bu, seçilen polimer modifikasyon içeriğine ve hazırlama yöntemine (yani stabilize edici ajanların eklenmesi) dayanmaktadır. Diğer çalışmalar, oksidasyon ve UV radyasyonunun polimerlerin hibrit kombinasyonlarının (stabilizatörlü / stabilizatörsüz) reolojik özellikleri üzerindeki etkisini ve geri dönüştürülmüş PE'nin zaman içindeki potansiyel bozulmasını değerlendirmek için hibrit polimer karışımlarının yaşlanma fenomenini ele almalıdır.

(2020)Cuciniello, G., Leandri,P., Polacco,G., Airey, G. ve Losa, M. çalışmalarında; yüksek oksidatif laboratuvar yaşlandırma seviyelerine maruz kalan Stiren Bütadien Stiren (SBS) ile modifiye edilmiş bitümlerdeki Zaman-sıcaklık süperpozisyon ilkesinin (TTSP) uygulanabilirliğini araştırmaktadırlar. Yaşlanmanın etkileri jel geçirgenlik kromatografisi (GPC), floresan mikroskobu (FM) ve doğrusal viskoelastik reolojik karakterizasyon ile araştırılmış.

Sonuç olarak; TTSP, modifiye edilmemiş bitümlere ancak uzun süreli yaşlanma sonrasında bir miktar bozulma ile uygulanabilir. Polimer ağı, TTSP'nin SBS ile modifiye edilmiş bitümlere uygulanabilirliğini etkiler. Düşük-orta SBS içerikleri, yüksek sıcaklıklarda

hafif TTSP bozulması, daha düşük sıcaklıklarda ise yüksek SBS içeriği hafif bozulma gösterir. Eski SBS ile modifiye edilmiş bağlayıcılar, termoreolojik sadeliğe doğru kaymaktadır. Kayıp tanjant, bağlayıcıdaki SBS ağının bütünlüğünün değerli bir göstergesidir. Sonuçlarına varılmış.

(2020)Tanzadeh, R. ve Shafabakhsh, G. çalışmalarında; parça kauçuğun (CR) pirolizinden karbon siyahı (CB) partikülleri üretilmiş ve CB partiküllerinden nano-karbon siyahı (NCB) elde edilmiş. Yaygın olarak kullanılan bir performans sınıfı (PG) bağlayıcı (PG 64-22), farklı CB ve NCB partikül dozajları ile modifiye edilmiş. . Temel laboratuvar bitüm testlerinden sonra modifiye bitümün penetrasyon indeksi ve rijitlik modülü hesaplanmış. Değişik modifiye edilmiş bitüm ve agregaların (kuvarsit, granit, kireçtaşı ve kumtaşı) farklı kombinasyonları arasındaki kohezyon ve yapışma çalışması hem sulu hem de susuz bir şekilde ölçülmüş.

Sonuç olarak; CB ve NCB parçacıkları ile modifiye edilen bitümün penetrasyon indeksi ve sertlik modülünün arttığını, statik temas açısının azaldığını göstermiş. Kireçtaşı ve kuvarsit en düşük yapışma çalışmasını göstermiş, kumtaşı ise ıslak koşullarda en yüksek yapışma çalışmasını göstermiş. Uyumluluk parametresi (CP) verilerine göre kireçtaşı ve kuvarsit, en uyumlu agregalar-bitüm yapısına sahip olduğu görülmüş. Daha yüksek CB ve NCB yüzdelerinin eklenmesiyle, CP değeri artan bir eğilim göstermiş. Son olarak, iki yeni istatistiksel modele göre, kohezyon çalışması ile değiştirilmiş bitümün sertlik modülü arasında doğrudan bir ilişki bulunduğu gözlemlenmiştir.

(2020) Jiang, Z., Easa, S. M., Hu, C. ve Zheng, X. çalışmalarında; stiren-butadienestiren modifiye edilmiş (SBS ile modifiye edilmiş) bitümlerin sönümleme özelliği ve mekanizmasına ilişkin yeni ve ön bir anlayış sunmaktadırlar. Sönümleme özelliği, bir dinamik kesme reometresi (DSR) ile kayıp faktörünün (LF) sıcaklık spektrumlarına göre değerlendirilmiş ve sönümleme mekanizması sırasıyla moleküler yapı, morfoloji ve termal analizden yorumlanmış.

Sonuç olarak; SBS ve bitümün moleküler özellikleri sönümleme performansını etkiler. Sönümleme, polimer karışımının bütünlüğünden ve uyumluluğundan büyük ölçüde etkilenmiştir. Crosslinker, SBS ve bitüm arasındaki uyumluluğu geliştirme potansiyeline sahiptir. Plastikleştirici, etkili sönümleme sıcaklığı aralığını artırabilir sonuçlarına varılmış.

(2020) Rahman, M.T., Mohajerani, A. ve Giustozzi, F. çalışmalarında; Taş mastik asfaltta sigara izmariti elyaf modifiye bitümün olası kullanımını araştırmışlar. Viskozite, karmaşık modül ve frekans, sıcaklık ve faz açısı ile ilişki gibi reolojik özellikler kurulmuş ve CB fiber modifiye bitümün yorulma hasarı direnç kriterlerini değerlendirmek için Doğrusal Genlik Süpürme (LAS) testi yapılmış. Taş mastik asfalt (SMA), CB fiber modifiye bitüm ile

hazırlanmış ve SMA'nın Marshall Stabilitesi ve Akışı incelenmiş ve geleneksel işlenmemiş selüloz fiber modifiye bitüm ile hazırlanan kontrol numunesi ile karşılaştırılmış.

Sonuç olarak; testin sonuçları endüstri standartlarını karşılamış ve saf selüloz elyaf yerine taş mastik asfalt yapımında CB elyaf modifiye bitüm kullanımını desteklediği görülmüş. Frekans tarama analizi, CB modifiye bitümün viskoelastik davranışını ortaya çıkarmış.

(2020) Sun, G., Ma, J., Sun, D., Li, B., Ling, S. ve Lu, T. çalışmalarında; sıcaklık ve termal oksidatif yaşlanmanın stiren-butadien-stiren (SBS) modifiye bitüm (SBS-MB) ve polietilenin kendi kendini iyileştirme yeteneği üzerindeki etkisini araştırmak için yorgunluk-iyileştirme-yorgunluk (FHF) testi yapmışlar.

Sonuç olarak; Bitümün optimum iyileştirme sıcaklığı yumuşama noktasından daha düşüktür ve bunu Newtonian akış sıcaklığı izler. Polimer modifiye bitümün iyileştirme yeteneği üzerindeki yaşlanma etkileri geniş bir sıcaklık aralığında incelenmelidir. SBS bitüm ve PE bitümün kendi kendini iyileştirme yetenekleri, yaşlanma ile yavaş yavaş zayıflar. Termal oksidatif yaşlanma, daha düşük sıcaklıklarda SBS bitüm ve PE(poli-etilen) bitümün iyileştirme yeteneklerine çeşitli etkiler kazandırır. Yaşlanma sırasında değiştirilmiş bitümlerin değişen faz yapısı ve polimer dağılımı, iyileşme eğrilerinin kaymasını ve iyileşme geçişini ortaya çıkarır. Sonuçlarına varılmış.

(2020) Gallu, R., Méchin, F., Dalmas, F., Gérard, J. F., Perrin, R. ve Loup, F. çalışmalarında; poli (stiren-b-butadien-b-stiren) blok kopolimerleri gibi geleneksel termoplastik elastomerlere bir alternatif olarak bir termoplastik poliüretan (TPU) kullanımını göz önünde bulunduran yeni bir polimer modifiyeli bitüm (PMB) türünü bildirmeyi amaçlamışlar.

Diğer blok kopolimerler için olduğu gibi, TPU'nun mikro fazda ayrılabilen iki tip segmentten oluşan yapısı, bitümün yağlı fraksiyonları tarafından seçici şişmesine yol açar. Sert segmentlerin (HS) bitümle zayıf uyumluluğu, TPU'nun malten fraksiyonları tarafından bu kısmi şişmesinden sorumludur. Bitüm-TPU karışımındaki TPU içeriğini değiştirerek, TPU bakımından zengin fazın süzülmesinden dolayı yüksek sıcaklıklarda elastik bir tepkinin ortaya çıkması ile ağırlıkça% 11'e yakın bir TPU içeriği için viskoelastik özelliklerde çarpıcı bir değişiklik gösterilir. Bu süzülme fenomeni, çok ölçekli morfoloji karakterizasyonları ile vurgulanmakta ve geleneksel bir mekanik süzülme modeli ile iyi tanımlanmaktadır. Farklı TPU mimarileri, yani farklı sert-yumuşak segment oranları incelenmiştir. En iyi uzlaşma, viskoelastik davranışını korurken, süzölmüş TPU açısından zengin fazda uygun bir şişme

sergilediğinden, ağırlıkça% 13 HS içeren TPU içeren bir karışım için bulunur. Değerlendirmelerinde bulunulmuş.

(2020) Erkuş, Y., Kök, B. V. ve Yılmaz, M. çalışmalarında; üç farklı katkı maddesi (kauçuk içeren atık araç lastikleri (CR), SBS, sasobit) kullanarak bitümü modifiye etmişler ve sonuçları gözlemlemişler. Her biri bağlayıcının farklı özelliklerini geliştirme yeteneğine sahip olan SBS, CR ve Sasobit'in birlikte kullanılmasının etkileri yumuşama noktası, viskozite, dinamik kayma reometresi (DSR) ile değerlendirilmiş ve bükme kırış reometre testleri (BBR) ile değerlendirilmiş.

Sonuç olarak; yüksek sıcaklık performansına göre SBS'nin tek kullanımından daha verimli olan birçok kombinasyonda üçlü bağlayıcı türleri olduğu ancak düşük sıcaklık davranışı değerlendirildiğinde kombinasyon sayısının azaldığı tespit edilmiş. Genel olarak,% 6 CR +% 2 SBS +% 2 Sasobit modifiye bağlayıcıların,% 6 SBS modifikasyonundan daha verimli olduğu bulunmuş.

(2020) Omairey, E.L., Zhang, Y., Gu F., Mab, T., Hu, P. ve Luo, R. çalışmalarında; yaşlanmayı geciktiren bileşiklerin, farklı yaşlanma koşullarına tabi tutulduğunda bitümün yorgunluk performansı üzerindeki etkilerini araştırmışlar. AAC ile modifiye edilmiş bitüm bağlayıcılar dinamik kesme reometresi (DSR) ve Fourier dönüşüm kızılötesi spektroskopi testi (FTIR) ile farklı yaşlandırma koşullarında, ince film fırın testi (TFOT) ile kısa süreli yaşlandırma ve basınçla uzun süreli yaşlandırma (PAV) dahil olmak üzere test edilmiş. AAC ile modifiye edilmiş bitümün yorgunluk performansı, yazarlar tarafından geliştirilen dağılmış enerji oranı (DER), SHRP yorgunluk parametresi ve DSR-çatlama (DSR-C) yaklaşımı ile karakterize edilmiş. Doğrusal genlik taraması (LAS) testleri, hasarsız koşullarda faz açılarını ve kesme modüllerini elde etmek için ilk olarak 20 ° C, 10 Hz ve% 0.1-15 kontrollü kayma gerinim koşullarında yürütülmüş. Zaman süpürme (TS) testleri, hasarlı koşullarda faz açıları, kesme modülü ve DER elde etmek için% 5 kesme geriniminde, ayrıca 20 ° C ve 10 Hz'de ve 24.000'e kadar yükleme döngüsünde gerçekleştirilmiş. . TS testlerindeki çatlak uzunlukları DSR-C modeli ile hesaplanmış ve ardından görüntü analizi yöntemi ile doğrulanmış.

Sonuç olarak; DLTDP / furfural, sertlikten ödün vermeden iyi yaşlanma karşıtı performans gösterir. AAC'lerin uzun süreli yaşlanma koşullarına maruz kaldıktan sonra bile bitüm üzerinde etkisi vardır. DSR-C modeli, AAC ile modifiye edilmiş bağlayıcının yorgunluk performansını etkili bir şekilde değerlendirebilir. Normalleştirilmiş karbonil indeksi, AAC'ler ile modifiye edilmiş bağlayıcıların yorgunluğu ile iyi bir korelasyon gösterir. AAC'ler, daha fazla çalışma gerektirecek şekilde, bağlayıcıların tekerlek izine karşı duyarlılığını artıracaktır. Sonuçlarına varılmış.

Katkı maddesi olarak grafen kullanılan çalışmalar

(2017) Zhou, X., Zhang, X., Xu, S., Wu, S., Liu, Q. ve Fan, Z. çalışmalarında; Grafen ve karbon nanotüplerin asfalt bağlayıcının termo-mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini moleküler simülasyonlar ve deneyler kullanarak belirlemek için karşılaştırmalı bir çalışma yapmışlar. Termal kararlılık ve cam geçiş sıcaklığı diferansiyel tarama kalorimetresi ile incelenmiş.

Sonuç olarak; her şeyden önce grafen modifiye asfaltın termal özelliklerinin karbon nanotüp ile modifiye edilmiş asfaltın termal özelliklerinden daha iyi olduğu gözlemlenmiş. Grafen ve karbon nanotüplerin optimum katkı maddesi miktarı sırasıyla ağırlıkça% 6.3 ve% 3.8 olarak bulunmuş. Ayrıca, grafen ve karbon nanotüpleri asfaltın termal özelliklerini iyileştirebilir olduğu görülmüş. Mekanik özelliklerin sonuçları ise, grafen veya karbon nanotüplerin eklenmesinin, asfalt sisteminin G (Kayma modülü), E (Elastisite Modülü), K ve sünekliğini geliştirebileceğini göstermiştir. Modifiye edilmiş asfalttaki fazla grafen, toplanmış parçacıklar olarak kalırken, çoğu karbon nanotüpün, modifiye edilmiş asfalt içinde dağıtılabilir olduğu gözlemlenmiş.

(2018) Navarro, F.M., Sánchez, M.S., Gámiz, F. ve Gámez, M.C.R. çalışmalarında; grafen ile modifiye edilmiş bağlayıcıların mekanik ve termal özelliklerini değerlendirmeyi amaçlamışlar. Bu amaçla, farklı dozlarda grafen pulları ile üretilen bağlayıcılar üzerinde reolojik ve termal testler yapılmış. Asfalt bağlayıcıların mekanik performansını analiz etmek için iki farklı reolojik test yapılmış: frekans ve sıcaklık tarama testi ve Çoklu Stres Sünme ve Geri Kazanım Testi (MSCRT). Ayrıca dinamik kesme reometresi testi (DSR) testi de uygulanarak sonuçlar gözlenmiş.

Sonuç olarak; Bir bitüm modifiye edici olarak grafenin kullanılması, bu malzemelerin kayma modülünü (G)(malzeme daha yüksek dozlarda eklendiğinde üç kattan fazla olabilen bir artış)arttırır ve faz açılarını hafifçe azaltabilir (yüksek grafendozajları için%10'dan fazla azalma elde edilebilir). Bu özelliklerin her ikisi de bitümleri daha esnek hale getirir ve yüksek sıcaklıklarda plastik deformasyonlara karşı dirençlerini arttırmaya yardımcı olabilir. Bununla birlikte, grafen ilavesi nedeniyle çatlak hasarına maruz kalma riski artar (aşırı miktarda grafen asfalt bağlayıcıyı çok kırılgan hale getirebilir). Elastomerler gibi diğer yaygın bitüm modifiye edicilerinde olduğu gibi, dinlenme süreleri ile gerilim yüklemesi altında dinamik mekanik tepki açısından, grafen ilavesinin deformasyonları geri kazanma kapasitesini kolaylaştırmadığı sonucuna varılabilir. Termal özellikler açısından, grafenile modifiye edilmiş bağlayıcıların saf bağlayıcılardan daha hızlı bir şekilde ısıtılabilirdiği, daha yüksek sıcaklıklara ulaşabildiği ve ısının malzeme boyunca daha hızlı yayılmasını sağladığı gösterilmiştir. Bu nedenle, grafenin

bitüm modifiye edici olarak kullanılması, ısının asfalt malzemelere transferini geliştirmeye yardımcı olabilir (grafenle modifiye edilmiş asfalt bağlayıcıları, sıcaklıklarını geleneksel asfalttan daha hızlı artırabilir ve bu stabilitelerini etkilemez).

(2018) Aravind, S., Isac, A.J. ve Aparajith, S. çalışmalarında; grafen ilavesi ile gözenekli asfalt karışımının performans özelliklerini incelemek ve gözenekli asfaltın dayanıklılığını ve mukavemetini laboratuvar testleri yoluyla arttırmayı amaçlamışlar. Bu deneysel çalışma iki ana adımdan oluşmaktadır. İlk adım, optimum bağlayıcı içeriğini belirlemek için gerçekleştirilen karışım tasarımı yapılmış ve ikinci aşamada grafençeşitli oranlarda (%0.05, 0.1, 0.15) eklenmiş. Örnekler üzerinde permeabilite, aşınma testi, indirektçekme dayanımı, Marshall stabilitesi, nem duyarlılığı ve parlama noktası testleri yapılmış.

Sonuç olarak; Grafen ilavesi mukavemeti normal bitümlü porozasfalta göre yaklaşık %14.71 arttırmış. Genel olarak poroz asfalt kaplamada grafen ilavesi performansı artırır. Sonuçlarına varmışlar.

(2018) Zhang, X.L., Guo, Y.D., Su, J.F., Han,S., Wang, Y.Y. ve Tan, Y.Q. çalışmalarında; grafen / organik gençleştirici içeren mikrokapsüller kullanılarak elektrotermal kendi kendini iyileştiren bitümlü kompozit materyali araştırmayı amaçlamışlar. Bu çalışmada katkı malzemesi olarak grafen, kendi kendini iyileltirme özelliğini kullanmak için yağlı gençleştirici (0.905 g/cm³, 4.24 Pa_s), polimerik kabuk malzemesi olarak heksametoksimetilmelamin (HMMM), dağıtıcı olarak ise Stiren maleik anhidritin (SMA) bir kopolimeri kullanılmış. 40/50 penetrasyonlu bitüm üzerine uygulanmış. Özel bir birleştirme yöntemiyle mikrokapsüller iki aşamalı kendiliğinden birleşen polimerizasyon işlemi) (grafen / HMMM hibrid kabuklara sahip gençleştirici içeren mikrokapsüllerin bir hazırlama işlemini gerçekleştirmişler. Daha sonra mikrokapsüllerin karakterizasyonu için SEM, termal direncini ölçmek için termogravimetrik analiz, elektriksel iletkenlik ölçümü, termal iletkenlik ölçümü, kendi kendini onarmasındaki verimlilik ölçümü yapılarak sonuçlar tartışılmış.

Sonuç olarak kısaca şunları söyleyebiliriz; Grafenin mikrokpsüllerin kabuklarında biriktiği gözlenmiş. Bu mikrokapsüllerin yük altındaki bitümün kendi kendini iyileştirme yeteneğini geliştirdiğini görmüşler.

(2019) Nazki, M.A., Chopra, T. ve Chandrappa, A.K. çalışmalarında; grafeni, modifiyebitümün reolojik ve termal özelliklerindeki artışı araştırmak için iletken dolgu maddesi olarak kullanmışlar. İki viskoziteli dereceli bitüm (VG30 ve VG40), ağırlıkça% 0.5, 1.0, 1.5 ve% 2.0 grafenile modifiye edilmiş. Yumuşama noktası testi, depolama stabilite testi, frekans

taraması, çoklu gerilim sürünme geri kazanımı (MSCR) testi ve termal iletkenlik testine tabi tutulmuş.

Sonuç olarak; Grafen ilavesi, düşük sıcaklıkta aşırı sertleşmeden ayrı yüksek sıcaklıktaki sertliği arttırmış. Grafen ilavesi geri kazanımı arttırdı, ancak polimer modifiye bitüm ile karşılaştırılmaz. Grafen ilavesi ile bitümün termal iletkenliği artmıştır. Reolojik gelişmeler göz önünde bulundurularak optimum grafen ilavesinin %1.0-1.5 olduğunu söylemişlerdir.

(2019) Guo, T., Wang, C., Chen, H., Li, Z., Chen, Q., Han, A., Jiang, D. ve Wang, Z. çalışmalarında; grafen ve tourmalin kullanarak bitümü modifiye etmişler ve grafen ve turmalinin sinerjik olarak artırılmasıyla asfaltın performansını artırmayı amaçlamışlar. Öncelikle grafen / turmalin kompozit modifiyeli asfalt hazırlanmış. Daha sonra grafen / turmalin kompozit modifiyeli asfaltın temel özellikleri ve reolojik özellikleri sistematik olarak analiz edilmiş.

Sonuç olarak; asfaltaki temel viskoelastik özelliklerin, asfalta grafen / turmalin kompozitleri ilave edildikten sonra yok olmadığı görülmüş. Grafen / turmalin kompozit modifiyeli asfaltın sürtünme direncinin turmalinden daha üstün olduğu tespit edilmiş. Ve kompozit malzeme içeriği ne kadar büyük olursa, değiştirilmiş asfaltın sürtünme direnci o kadar yüksek çıkmış. Asfaltın kırılma direnci ise % 10.12 artmış.

MATERYAL VE METOT

Kullanılan Malzemeler

Modifiyer olarak kullanılan malzeme: Grafen (Özellikleri Tablo 3 de verilmiştir.)
Bitüm: 70/100 penetrasyonlu bitüm

Tablo 3. Grafenin Özellikleri

Renk	Siyah
Saflık	%99.9
Ortalama Kalınlık	3-8 nm
Yüzey Alanı	530 m ² /g
Çap	1.5 µm

Son zamanlarda bilim dünyasında büyük ses getiren grafen esasen zor bulunan bir malzeme değildir. Herkesin kullandığı kurşun kalemilerin içindeki grafit, grafen tabakalarının üst üste binmesinden oluşmaktadır. Isıyı iyi iletmesi ve bilinen en ince malzeme olmasına rağmen yapısında bulunan güçlü karbon bağları grafene yeryüzünde bilinen en sağlam malzemelerden biri olma özelliğini kazandırmıştır. Yine çok sağlam bir malzeme olan çelikten 100-300 kat daha sağlam, bakırdan yüzlerce kat daha iletken olan grafenin ilk seri üretim tesisi 2020 yılında Ankara’da açılmış ve Türkiye bu yatırımla, grafeni seri üretebilen 10 ülkeden biri konumuna gelmiştir. Grafen Konseyi’nin yayımladığı 2020 Grafen Araştırma Raporu’na göre, sektörün karşılaştığı sorunların başında maliyet, seri üretim kabiliyeti, standart ve sertifikasyon problemleri vardır. Bu zorluklar nedeniyle grafen dünyada en çok Ar-Ge yatırımı yapılan ürünlerden birisidir. Açılan bu tesiste (Nanografi) hem yurt dışına bağımlılık olmayıp kendi kaynaklarımızla grafen üretimi yapılabilir hem de özgün bir yöntem kullanılarak standartlara uygun bir şekilde seri üretim yapılabilir.



Şekil 7. Grafen ve özellikleri

Bulunmasıyla beraber büyük bir yankı uyandıran grafen, ilk başlarda teknolojik cihazlarda kullanılmıştır. Önce transistor alanında kullanılan bu malzemeye Andre Geim ve Konstantin Novaslov bir atom kalınlığında ve en çok elli atom genişliğinde, grafen tabanlı bir transistor geliştirerek Nobel Fizik Ödülü'nü almaya hak kazanmışlardır. (Çiftçi vd 2016)

Grafen kendine kullanım alanını en çok karbon nanotüp hali ile bulmuştur. Grafenin önemli bir özelliği de inanılmaz boyutta dayanıklı olmasıdır. Bununla alakalı yapılan çalışmalarda bilinen en güçlü malzemelerden biri olan elmas keskilerine karşı bile dayanıklı olduğu görülmüştür. Kullanım alanı oldukça geniş olan grafenin elektronik özellikleri de birçok sebepten dolayı, hem deneysel hem de teorik açıdan günümüz fizikçilerinin ilgi odağı olmuştur.

İnce yapısı ve birçok farklı özelliğiyle grafenden üretilen grafen aerojel, eğilip bükülme olmadan kendi ağırlığının kırk bin katını taşıyabilmektedir. Grafenden elde edilen köpük, 1 santimetrekareye 1 tondan daha fazla darbeye de dayanabilmekte, orijinal boyutunun %5'ine kadar sıkıştırılabilirken, tekrar kendi boyutuna ve biçimine dönebildiği bilinmektedir. Sıkıştırma işlemi çok kez tekrarlanmış ancak malzemede hiçbir deformasyon olmamıştır.

Tek katmanlı altıgen karbon atomlarından oluşan grafenin en bilinen özelliklerini aşağıdaki gibi sıralamak mümkündür: (Çiftçi vd 2016)

- Çelikten yaklaşık 100-300 kat daha sağlamdır.
- Oda sıcaklığında bilinen en iyi iletkenidir.
- Çok saydam, sert ve esnektir. Grafenin elmadan bile sert olduğunu teyit eden Columbia Üniversitesi, aynı zamanda maddenin %20 oranında esneyebildiğini yaptığı çalışmalarla belirlemiştir. Yani, lastik kadar esnek olan grafen, gelecekte kol saatlerinden bantlara, hatta dokunmatik tişörtlere kadar çeşitli giyilebilir

teknolojilere ön ayak olacak denilebilir. Grafenin su geçirmeme özelliği ise günümüzde kullandığımız elektronik cihazların su geçirmeme teknolojisini ve donanımını gereksiz kılacak.

- Saptanan en hafif ve ince malzemedir.
- Grafen bulunan ilk iki boyutlu malzemedir ve bu yüzden teknoloji konusunda fazlaca ilgi çekmektedir. Rulo haline gelmiş şekli olan karbon nano tüpler ile alakalı bulunduğu günden bugüne kadar elektronikten sağlığa birçok farklı alanda yüzlerce kullanım alanı düşünülmüş ve yavaş yavaş uygulanmaya başlanmıştır.

Grafen, yol mühendisliğinde kullanılacak yeni nesil asfalt bağlayıcıların geliştirilmesi için umut verici bir malzeme olarak kabul edilmektedir. Bununla birlikte, grafenin bitüme ekleyebileceği potansiyel avantajlara rağmen, şu anda mevcut bağlayıcıların performansına gerçek katkısını ölçebilen çok az çalışma vardır hatta ülkemizde henüz bunun hakkında yapılmış bir çalışma bulunmamaktadır. Bu nedenle biz de bir çalışma yapmaya karar verdik.

Uygulanan Deneyler

Penetrasyon deneyi

Deney TSE 118 EN 1426, ASTM D5 standardı ile yapılır. Penetrasyon deneyi, bitümlü bağlayıcıların sertliğini ve kıvamını belirlemek amacıyla uygulanmaktadır. Penetrasyon; standartlarda belirlenen bir iğnenin 100 gramlık kütle ile, belirli bir süre içinde, 25°C sıcaklıkta düşey doğrultuda bitüm numunesine batma miktarının bir ölçüdür. Birimi 0.1 mm'dir. Penetrasyon cihazı (Şekil 8) göstergesindeki her çizgi 0.1 mm'ye tekabül etmektedir.



Şekil 8. Penetrasyon deney aleti

Tablo 4. Penetrasyon Değerleri Arasında Olabilecek En Büyük Farklar(Erkuş 2017)

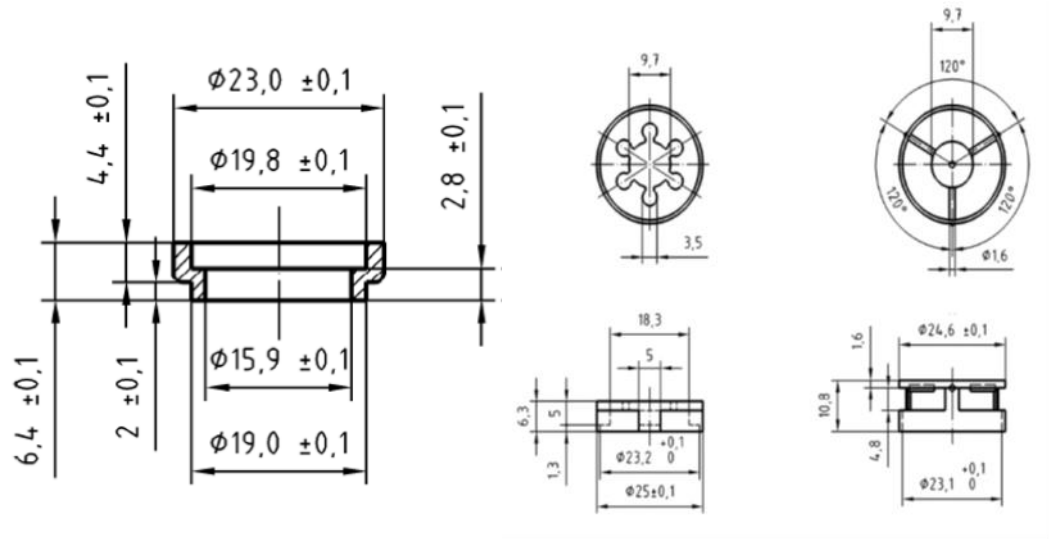
Penetrasyon Değeri	≤49	50-149	150-249	≥250
Maks Penetrasyon Farkı	2	4	6	8

Tablo 4'teki değerlere göre 25°C'de 100 gramlık kütle için, ölçümler arası farkın verilen değerleri aşmadığı sürece deneyler geçerli sayılır. Standartlarda verilen fark değerinin aşılması durumunda ise yeni bir numune alınır ve deney tekrar yapılır. Eğer yine de yapılan deneylerde sıkıntı olursa ve istenilen sonuca varılamazsa elde edilen veriler dikkate alınmayıp numuneler atılır. Bir deney numunesi ile üç farklı ölçüm alınır ve bu ölçümlerin aritmetik ortalaması hesaplanarak çıkan sonuç numunenin penetrasyon değeri olarak alınır. (Erkuş 2017).

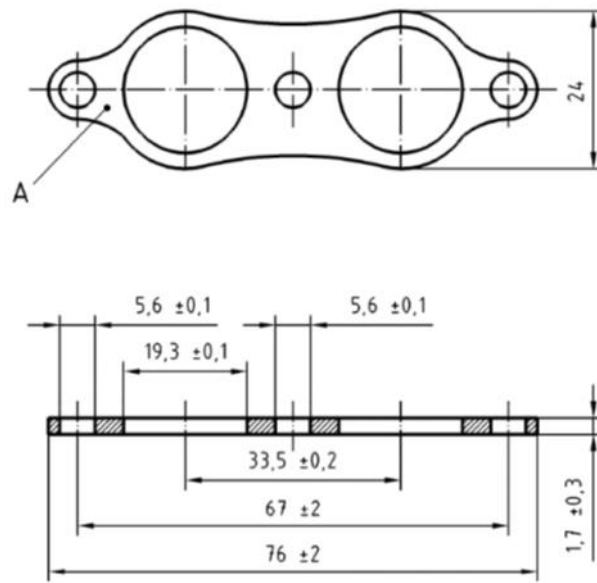
Yumuşama noktası deneyi

Deney TS EN 1427 standardı ile yapılır. Bu yöntem, bitümün ve bitümlü bağlayıcıların 28°C-150°C aralığındaki yumuşama noktasının tayinini kapsar. Ayrıca bu deney bitümün sıcaklık karşısında nasıl davrandığını, kıvamlılığını belirlemek için kullanılır. Yumuşama noktası değerleri ile bitümün viskozite değerleri doğru orantılıyken penetrasyon değerleri ile ters orantılıdır. Numune hazırlanırken öncelikle temiz bir yüzeye çok ince bir film halinde vazelin sürülür ve pirinçten yapılmış halkalar (Şekil 9 ve 10) buraya konulur. Ardından ısıtılmış ve akışkan hale getirilmiş numune dökülerek soğuması ve katılaşması için bir süre beklenir. Daha sonra numune üzerindeki fazla kısımlar bir ısıtılmış bıçak yardımıyla alınır ve içerisinde su bulunan bir kabın içine pirinç halkalar üzerine bir bilye konularak su banyosunda bekletilir. Başlangıç sıcaklığı 5±1 °C olacak şekilde ayarlanır. Hazır olan deney düzeneği Şekil 11'de görüldüğü gibi ısıtıcı üzerine yerleştirilir. Isıtıcı deney sıcaklığı dakikada 5°C olacak şekilde ayarlanır. Pirinç halkalar içerisindeki bitümün bilyelerle birlikte aşağıya sarkan kısmı deney sehpaına değdiği anda termometrenin gösterdiği sıcaklık değeri yumuşama noktası olarak kabul edilir.(Şekil 12)

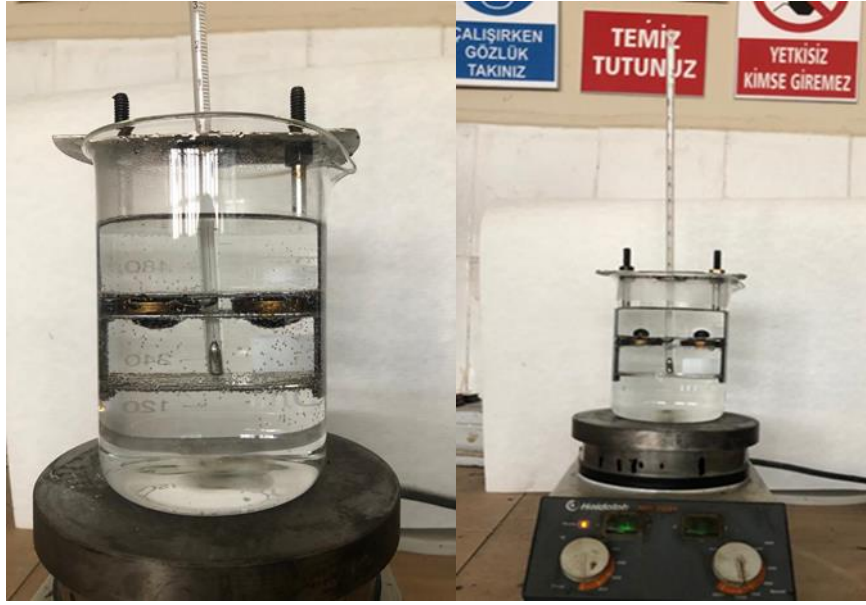
Deney aletleri; iki adet pirinçten yapılmış halka, 9.50±0.05 mm çapında iki adet çelik bilye, yarı otomatik ya da tam otomatik olan bir ısıtıcı, numune dökümü sırasında halkaların altına konulan çelik sehpa, ısıya dayanıklı yeterli boyutta bir cam beher (600-800ml), beher içinde homojen bir sıcaklık sağlamak amacıyla beher dibinde dönecek mıknatıslı olma özelliğine sahip bir çubuk ve uygun bir termometredir.



Şekil 9. Yumuşama noktası halka ve bilye boyutları (TC Bayındırlık Bakanlığı 1988)



Şekil 10. Halka tutucu boyutları (TC Bayındırlık Bakanlığı 1988)



Şekil 11. Yumuşama noktası deney düzeneği

Deney sonuçlarının hesaplanması ise şu şekilde yapılır;

Kullanılan iki bilyeden herbiri için elde edilen sıcaklıklar arasındaki fark, yumuşama noktası $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'nin altındaki numuneler için 1°C , üstünde olan numuneler için 2°C ' yi geçerse deney tekrar edilir ve okunan değerlerin aritmetik ortalaması alınarak yumuşama noktası değeri elde edilir(Karacasu 2016).



Şekil 12. Yumuşama noktası deneyi

Parlama noktası deneyi

TSE 123 standardı ile tanımlanan parlama noktası, bitümün alevle temas etmesi durumunda geçici olarak parlaması ancak sürekli bir yanmanın olmadığı en düşük sıcaklık derecesi olarak açıklanır. Bitümün parlama noktasının bilinmesi, uygulanma aşamasında

ısıtılırken ortaya çıkabilecek herhangi bir tutuşma ve yangın riskinin engellenmesi açısından oldukça önem arz etmektedir. (TC Bayındırlık Bakanlığı 1988).



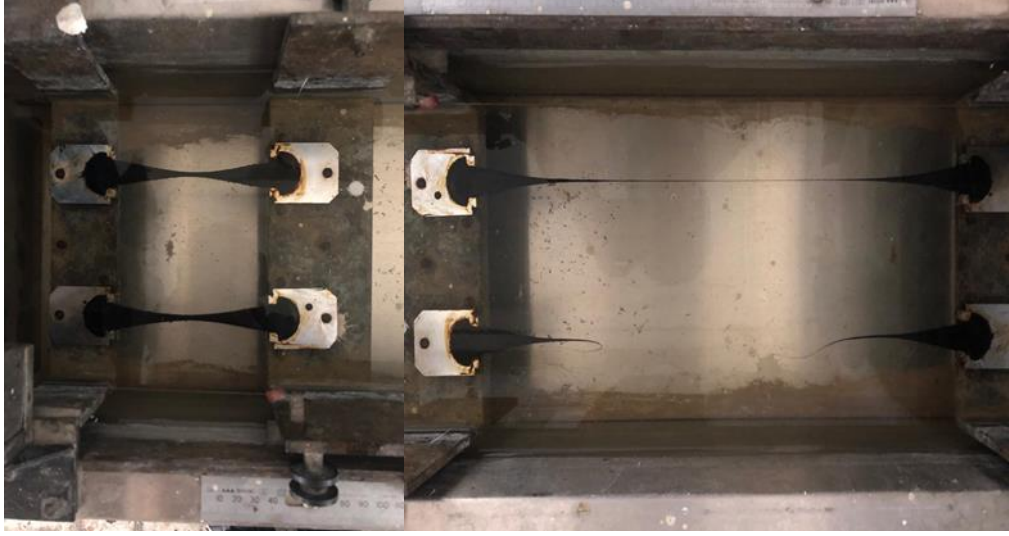
Şekil 13. Parlama noktası deneyi

Düktilite deneyi

Deney, ASTM D113 standardına göre yapılır. Bu metot, bitümlü bir malzemenin çekme özelliklerinin ölçümü ve düktilitesini belirleme prosedürünü kapsar. Aksi belirtilmedikçe, deney $(25 \pm 0,5)$ °C sıcaklık ve 5 cm/dak ($\pm \% 5,0$) hızda gerçekleştirilir.

Kalıp pirinç bir plakaya monte edilir. Plakanın yüzeyi, kalıbın a ve a' yüzeyleri kalıp ayırıcı ile kaplanır. Kalıbın yerleştirildiği plaka düz ve dengeli olmalıdır. Yeterince sıvı hale gelene kadar numune ısıtılır. Tamamen karıştırıldıktan sonra numune kalıba dökülür. Kalıp doldurulurken numune şeklinin bozulmaması için kalıp parçalarının düzeninin bozulmamasına da dikkat edilir. Kalıp tam dolu seviyesinden biraz fazla malzeme ile doldurulur. Dolu kalıp oda sıcaklığında 35 ± 5 dakika bekletilir. Daha sonra deney sıcaklığında su banyosuna 35 ± 5 dakika konulur. Numune su banyosundan çıkarılır ve kırma aracı ile fazla malzeme traşlanır.

Traşlanan numune ve kalıp 90 ± 5 dakika belirlenen sıcaklıkta su banyosuna yerleştirilir. Numune ve plaka arasında bir kesme hareketi ile numunenin bükülmesinden kaçınılarak numune plakadan ayrılır. Yan parçalar (a ve a') numuneye zarar vermeden kaldırılır. Kelepçelerin ucundaki halkalar deney makinesindeki pimlere ya da kancalara tutturulur ve numune kopana ya da uzunluk limitlerine ulaşana kadar iki kelepçe belirtilen sabit hızda çekilir. Kopma gerçekleştiğinde ya da son uzunluğa ulaşıldığında elde edilen uzunluk santimetre cinsinden ölçülür. Kabul edilebilir 3 okumanın aritmetik ortalaması alındıktan sonra cm cinsinden raporlama yapılır. (TC Bayındırlık Bakanlığı 1988)



Şekil 14. Düktilite deneyi

Dönel ince film ısıtma kaybı deneyi (RTFOT)

Bu deney yardımıyla bağlayıcıların ve bitümlü sıcak karışımların üretimi ve yapımı boyunca kısa dönemli yaşlanma özellikleri belirlenir.

RTFOT deney düzeneği Şekil 15 de verilmiştir.



Şekil 15. RTFOT deney düzeneği

8 adet olan numune kaplarına yaklaşık 35 ± 0.5 gr bitüm numunesi konulur ve şişeler dönel tablaya yerleştirilir. Tabla 15 devir/dak. İle 85 dakika döndürülür. Deney sıcaklığı 163 ± 0.5 °C dir. Ardından numuneler teker teker ve dikkatli bir şekilde dışarı alınarak son ağırlığı ölçülür ve soğumaya bırakılır. İki adet numunenin deney sonuçlarının aritmetik ortalaması ısıtma kaybı değeri olarak alınabilir. Diğer numuneler Superpave deneylerinde kullanılmak üzere muhafaza edilir. Bitümlü maddenin ısıtma kaybı aşağıdaki formül yardımıyla hesaplanır (Karacasu 2016).

$$\text{Bitüm ısıtma kaybı} = \frac{M_1 - M_2}{M_1} \times 100(\%)$$

M_1 = İlk numune ağırlığı (gr)

M_2 = Deney sonrası numune ağırlığı (gr)

Bu deney öncesinde ve sonrasında kullanılan bitüm için 25 °C de penetrasyonu, yumuşama noktası ölçülür.

$$\text{Penetrasyon oranı (\%)} = \frac{P_2}{P_1} \times 100$$

P_1 = Deney öncesi penetrasyon (0.1 mm)

P_2 = Deney sonrası penetrasyon (0.1 mm)

$$\text{Yumuşama noktasında artış} = T_2 - T_1$$

T_1 = Deney öncesi yumuşama noktası (°C)

T_2 = Deney sonrası yumuşama noktası (°C)

Taguchi Metodu

Tam faktöriyel deney tasarımı, bir parametre değiştirilirken diğer tüm parametreler sabit tutulur. Deney sayısı oldukça fazla olup ne yazık ki bu deneylerin pratikte yapılması mümkün değildir. Bunun yanı sıra, eğer parametreler arasında bir iç etkileşim bulunuyorsa, geleneksel deney tasarımı göre bulunan optimum şartlar, gerçek optimum şartları yansıtmayabilir. Bu olumsuzluklardan kurtulmak için birçok farklı deney tasarımı önerilmiştir. Bu tasarımlar arasında yer alan Taguchi Metodu optimizasyon için başarılı bir şekilde uygulanmaktadır. (Bayrak 2007) Bu çalışmada genel olarak grafen ile modifiye edilmiş bitümlü bağlayıcının performans özelliklerinin ne ölçüde değiştiğinin gözlemlenmesi amaçlanmıştır. Bu doğrultuda elde edilen sonuçlar Taguchi Optimizasyon Metodu (Roy 1990, Peace 1993) kullanılarak değerlendirilmiş ve modifiye bitümün penetrasyon değerleri, yumuşama noktası değerleri ve düktilite değerleri bu yöntem kullanılarak optimize edilmiştir.

Deneyler sonucu elde edilen veriler kullanılarak S/N değerleri için, en büyük en iyi (the bigger the better) kalite karakteristiği referans alınarak aşağıda verilen eşitlik yardımıyla hesaplama yapılmıştır. (Bayrak 2002)

$$SN_L = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{Y_i^2} \right]$$

Burada;

SN_L : Performans İstatistiği

n: Bir deney kombinasyonunda yapılan tekrar sayısı

Y_i : i. Deneyin performans istatistiğidir.

En büyük en iyi yöntemine göre SN_L 'yi maksimum yapan parametre seviyeleri optimum olarak kabul edilir fakat Taguchi Metoduna optimum parametre seviyelerini veren deney yapılmamış ise optimum şartlara karşılık gelen performans değeri aşağıdaki eşitlik yardımıyla bulunabilir.

$$Y_t = \mu + X_i + e_i$$

Burada;

μ : Performans değerinin genel ortalaması

X_i : Deneydeki parametre- seviye kombinasyonunun sabit etkisi

e_i : i. Deneydeki rassal hata



ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Numunenin Hazırlanması

Deney tasarımı için kullanılan Taguchi Metodu L9 ortogonal dizisindeki (Tablo 5) parametre ve seviyeleri dikkate alınarak dokuz farklı numune hazırlanmıştır. Numuneler hazırlarken karıştırma sıcaklığı 155 °C de sabit tutulmuştur.

Tablo 5. Karışım Parametreleri

Deney No	Grafen (%)	Karıştırma hızı (rpm)	Karıştırma süresi (saat)
1	0.5	1000	½ (30 dakika)
2	0.5	2000	¾ (45 dakika)
3	0.5	3000	1 (60 dakika)
4	1.0	1000	¾ (45 dakika)
5	1.0	2000	1 (60 dakika)
6	1.0	3000	½ (30 dakika)
7	1.5	1000	1 (60 dakika)
8	1.5	2000	½ (30 dakika)
9	1.5	3000	¾ (45 dakika)

Penetrasyon Deneyi ve Sonuçları

Öncelikle yaşlanma öncesi penetrasyonunu öğrenmek için her bir deney için ayrı ayrı alınan ikişer numune 25°C de ayarlanmış olan su banyosunda 1 saat 30 dakika bekletilerek deneye alınmışlardır. Daha sonra yaşlanma sonrası numune için de aynı şartlarda kür uygulanarak deneye tabi tutulmuş ve sonuçlar Tablo 6 da verilmiştir.

Tablo 6. Penetrasyon Deney Sonuçları

Deneyler	RTFOT Öncesi			RTFOT Sonrası
	Numune 1 (0,1 mm)	Numune 2 (0,1 mm)	Ortalama (0,1 mm)	Numune (0,1 mm)
Saf Bitüm	83,3	87,3	85,3	49,3
1	78,00	75,00	76,50	48,80
2	71,80	82,60	77,20	49,70
3	75,80	77,40	76,60	47,60
4	73,40	72,80	73,10	48,10
5	71,20	70,00	70,60	46,50
6	74,80	75,40	75,10	48,80
7	67,60	66,8	67,7	44,20
8	69,90	70,1	70,9	43,90
9	72,70	78,5	77,8	43,40

Tablo 6'dan da görüleceği üzere saf bitümün penetrasyon değerlerine göre grafen ile modifiye edilmiş bitümün penetrasyon değerleri grafen ilavesi arttıkça azalmıştır. Her ne kadar bitümün penetrasyon sınıfı değişmemiş olsa da bu düşüşler grafen ilavesinin bitümü sertleştirdiğini göstermektedir. Benzer şekilde Nazki (2019) yaptıkları çalışmada grafen ilavesinin bitümü sertleştirdiğini söylemişlerdir. Yine aynı tabloya bakıldığında yaşlanma sonrası saf bitümün penetrasyon değeri yaklaşık olarak %42 oranında düşerken, modifiye bitümün penetrasyonundaki düşüş yaklaşık olarak %34-%44 arasında değişmektedir.

Tablodaki değerler; ortam ısısı, deneyi yapan kişinin okuması, deney aletinin özellikleri gibi sebeplerin yanısıra numune hazırlanırken karıştırma hızı ve süresinden de etkilenmektedir. Örneğin 3000 rpm hızda karıştırmak 1000 rpm hızda karıştırmaktan daha iyi daha homojen bir karışım sağladığı gözlemlenmiştir. Ayrıca karıştırma süresi arttıkça homojenliğin de arttığı dolayısıyla grafenin bitüm içerisindeki davranışının daha iyi gözlemlenmesine neden olduğu söylenebilir.

Yumuşama Noktası Deneyi ve Sonuçları

Öncelikle yaşlanma öncesi yumuşama noktasını belirlemek için ayrı ayrı alınan ikişer numune, 5°C'ye ayarlanmış olan soğutucuda 1 saat bekletilerek numunelerin deney sıcaklığına getirilmesi sağlanmıştır. Daha sonra yaşlanma sonrası numune için de aynı şartlar uygulanarak deney yapılmış ve sonuçlar Tablo 7'de verilmiştir. Saf bitümün yumuşama noktası 51°C olarak belirlenmiştir. Penetrasyon deneyinden elde edilen sonuçlara göre, grafen ilavesi bitümün sertleşmesine neden olmaktadır. Penetrasyon değerinin düşmesi ile yumuşama noktasının artması beklenmektedir. Tablo 7'ye bakıldığında, tüm grafen ilavelerinin yumuşama noktalarının saf bitümünkinden yüksek olduğu görülmektedir. Bu sonuçlar penetrasyon değerleri ile yumuşama noktası değerlerinin uyumluluğunu göstermektedir. Saf bitümün yumuşama noktasındaki değişim yaklaşık olarak %15 olurken, grafen ilavesi ile yumuşama noktasındaki artışlar yaklaşık olarak %10-%22 arasında değişmektedir.

Tablo 7. Yumuşama Deneyi Sonuçları

DENEY NO	RTFOT Öncesi (°C)	RTFOT Sonrası (°C)
Saf Bitüm	51	58,5
1	54,30	62,40
2	55,10	61,20
3	56,60	62,30
4	60,70	69,50
5	60,80	70,20
6	59,20	62,50
7	65,20	73,80
8	59,30	66,10
9	58,10	71,00

Parlama Noktası Deneyi ve Sonuçları

Hazırlanan karışımlardan her bir deney için alınan numuneler üzerinde parlama noktası deneyi yapılmış ve sonuçlar Tablo 8’de verilmiştir. Güvenlik amacıyla yapılan bu deney için Karayolları modifiye bitüm şartnamesinde (Kısım 412 sayfa 10) parlama noktasının 220 °C’den düşük olması istenmektedir. Tablodan görüldüğü üzere grafen ilavesi oranı arttıkça parlama noktası değeri düşmüştür. Ancak, tüm grafen oranlarından elde edilen değerler 220 °C’nin üstünde çıkmıştır. Dolayısıyla elde edilen karışımların Karayolları teknik şartnamesine uygun olduğu söylenebilir.

Tablo 8. Parlama Noktası Deneyi Sonuçları

DENEY NO	RTFOT ÖNCESİ (°C)
SAF BİTÜM	240
1	245
2	245
3	250
4	240
5	243
6	245
7	240
8	237
9	238

Düktilite Deneyi

Modifiye edilmiş karışımdan iki numune alınarak öncelikle 25 °C'ye ayarlanmış su banyosunda 1 saat 30 dakika bekletilerek numune sıcaklığı ayarlanmıştır. Daha sonra yine su sıcaklığı 25 °C ye ayarlanmış düktilite deney aletinde deneye tabi tutularak Tablo 9'da verilen değerler elde edilmiştir.

Tablo 9. Düktilite Deneyi Sonuçları

DENEYLER	NUMUNE 1 (cm)	NUMUNE 2 (cm)
SAF BİTÜM	52,5	56,5
1	50,30	52,70
2	51,30	52,90
3	49,60	50,60
4	45,80	47,00
5	47,20	45,80
6	49,60	47,00
7	45,70	43,10
8	46,80	48,80
9	47,60	49,40

Düktilitenin sözlük anlamı çekilebilme veya uzama demektir. Asfalt çimentolarının önemli özelliklerinden biri olan düktilite, bitümlü bağlayıcıların esneklik-süneklik davranışını belirlemektedir. Aynı zamanda bitümlü bağlayıcının agrega ile bağlanma kabiliyetini göstermektedir. Uzama yeteneği fazla olan asfalt çimentoları, düşük olanlara göre daha üstün bir bağlama yeteneğine sahiptirler. Ancak, yüksek düktilite değerlerine sahip olan asfalt çimentoları sıcaklık değişimlerine karşı fazla duyarlılık gösterirler. Tabloya bakıldığında düktilite değerlerinin grafen ilavesi arttıkça düştüğü görülmektedir. Düktilite de penetrasyon ve yumuşama noktası gibi bir kıvam deneyidir. Kıvamın artması bitümün sertleşmesini gösterdiğinden, grafen ilavesi ile modifiye bitümün saf bitüme göre daha kısa uzunlukta kopması beklenmektedir. Tablo 9'da grafen miktarının artması ile düktilite değerlerinde azalma meydana geldiği görülmektedir. Meydana gelen bu azalmanın modifiye bitümün kıvamının arttığını ve dolayısıyla bitümün sertleştiğini göstermektedir. Elde edilen bu sonuçların penetrasyon ve yumuşama noktasından elde edilen değerlerle uyumlu olduğu söylenebilir.

Dönel İnce Film Isıtma Kaybı Deneyi(RTFOT) ve Sonuçları

Bitümlü sıcak karışım üretim ve yapımı süresince bitümün yaşlanmasını belirlemek amacıyla yapılan bir deneydir. Bu deneyde, bitümlü bağlayıcıların üzerinde sıcaklık ve havanın bileşik etkisi incelenmektedir. Dönel ince film halinde ısıtma deneyinde, ısıtma sonucu kütle

kaybı belirlenebilmekte ayrıca bitümlü bağlayıcının fiziksel özelliklerindeki değişim tespit edilebilmektedir. Hazırlanan modifiye karışımından alınan bitüm örneği 6 adet cam kap içerisine 35 gr alındıktan sonra RTFOT'a yerleştirilmiştir. Numuneler 163°C sıcaklıkta 85 dakika yaşlanmaya maruz bırakılmıştır. Deney sonunda numuneler tartılarak ağırlık kayıpları hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamalar ve sonuçların ortalaması Tablo 10'da gösterilmiştir.

Tablo 10. RTFOT Deney Sonuçları

Deney No	Saf Bitüm	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Isıtma Kaybı $\frac{M_1-M_2}{M_1} \times 100$ (%)	0,74	0,89	0,78	0,85	0,74	0,76	0,78	0,74	0,69	0,72

Karayolları modifiye bitüm teknik şartnamesinde herhangi bir bitüm için kütle kaybı %1'den az olmalıdır. Grafen ile modifiye edilen bitüm için tüm değerler %1'in altında bulunmuştur.

Yumuşama noktası deneyi için taguchi metodu uygulanması

Tablo 11. Taguchi Metoduna Göre Yumuşama Noktası Deney Sonuçları

Deney No	Performans İstatistiği (S/N)	
	RTFOT öncesi	RTFOT sonrası
1	34,696	35,904
2	34,823	35,735
3	35,054	35,890
4	35,664	36,840
5	35,678	36,928
6	35,446	35,918
7	36,285	37,355
8	35,461	36,404
9	35,284	37,025

Tablo 12. Yumuşama Noktası Deneyi Ortalama S/N Etkileri- RTFOT Öncesi

Ortalama S/N Etkileri			
	Grafen	Kar. Hızı	Kar. Süre
1. Seviye	34,858	35,548	35,201
2. Seviye	35,596	35,321	35,257
3. Seviye	35,677	35,261	35,672

Tablo 13. Yumuşama Noktası Deneyi Ortalama S/N Etkileri- RTFOT Sonrası

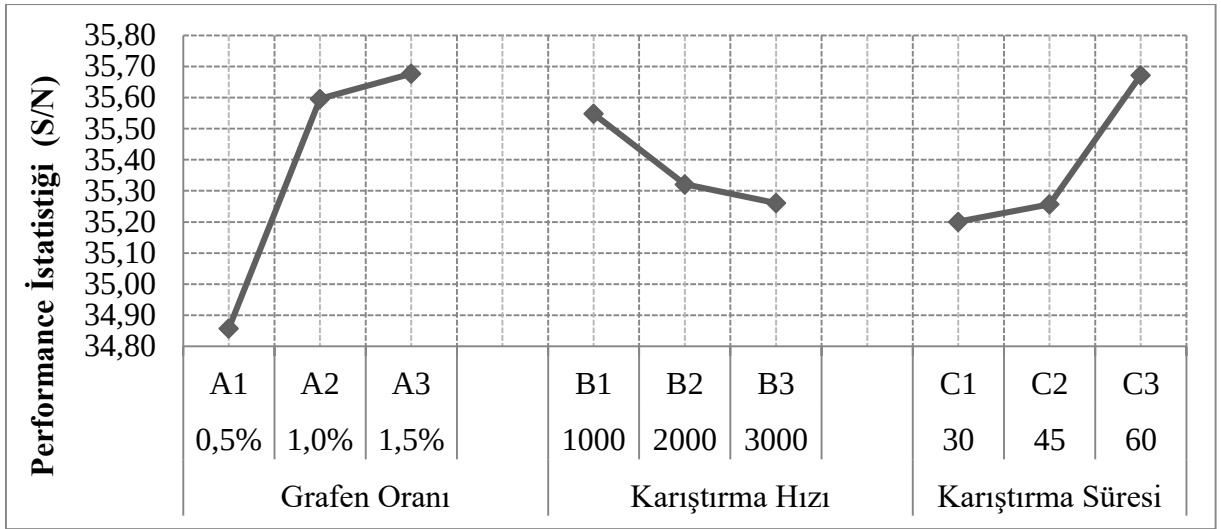
	Grafen	Kar. Hızı	Kar. Süre
1. Seviye	35,843	36,700	36,075
2. Seviye	36,562	36,356	36,533
3. Seviye	36,928	36,278	36,724

Tablo 14. Yumuşama Noktasını Optimum Yapan Koşullar ve Performans Tayini-RTFOT Öncesi

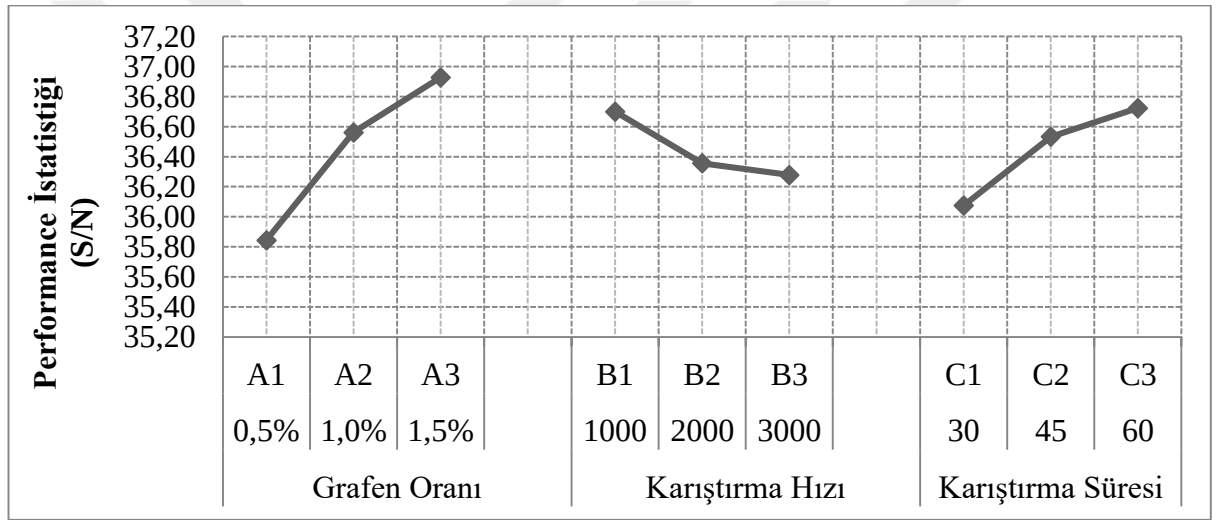
Faktörler	Seviye No	S/N' e Olan Katkısı
Grafen	3	0,300
Kar. Hızı	1	0,171
Kar. Süre	3	0.295
Tüm Faktörlerin Katkısı (S/N)		0.766
Ortalama Performans İstatistiği (S/N)		35.377
Optimum Şartlarda Beklenen Değer (S/N)		36.143
Doğrulama Deneyi Sonucu (S/N) / (0.1 mm)		35.90 /62.40
Güven Aralığı ($\alpha=95\%$) (S/N)		35.621 – 36.665

Tablo 15. Yumuşama Noktasını Optimum Yapan Koşullar ve Performans Tayini-RTFOT Sonrası

Faktörler	Seviye No	S/N' e Olan Katkısı
Grafen	3	0,484
Kar. Hızı	1	0,256
Kar. Süre	3	0,280
Tüm Faktörlerin Katkısı (S/N)		1,020
Ortalama Performans İstatistiği (S/N)		36,444
Optimum Şartlarda Beklenen Değer (S/N)		37,464
Doğrulama Deneyi Sonucu (S/N) / (0.1 mm)		37.29 / 73.20
Güven Aralığı ($\alpha=95\%$) (S/N)		36.934 – 37.994



Şekil 16. Parametrelerin yumuşama noktası üzerinde etkisi- RTFOT öncesi



Şekil 17. Parametrelerin yumuşama noktası üzerinde etkisi- RTFOT sonrası

Yumuşama noktası deneyinin değerlendirilmesi

Farklı karışım oranları, karıştırma hızları ve karıştırma sürelerindeki her bir numune üzerindeki yapılan yumuşama noktası deneylerinde elde edilen sonuçlar Tablo 11’de verilmiştir. Tablo 11 yardımıyla elde edilen ortalama S/N etkileri Tablo 12 ve 13’te verilmiştir. Bu tablolardaki maksimum değerler yumuşama noktası için optimum değerlerdir. Bu değerler yardımıyla parametrelerin yumuşama noktası üzerindeki etkileri Şekil 16 ve 17’de verilmiştir.

Şekil 16 (RTFOT öncesi) incelendiğinde, yumuşama noktasını maksimum yapan optimum durum için Grafen miktarının 3. seviyesi olan %1,5 oranı, karıştırma hızının 1. seviyesi olan 1000 rpm ve karıştırma süresinin 3. seviyesi olan 60 dakika (A3 B1 C3) bulunmuştur. Optimum durumdaki deney kombinasyonu olan A3 B1 C3 Tablo 5’te verilen deney planında bulunmamaktadır. Bu değer aslında bir nokta tahmindir. Yapılan tahminin doğru olup olmadığını anlayabilmek için A3 B1 C3 kombinasyonunda doğrulama deneyi

yapılıp %5 hata seviyesinde güven aralığı içine girip girmediği kontrol edilmelidir. Yapılan doğrulama deneyi yaklaşık 62,4 °C (S/N:35,904) olarak bulunmuştur. Bu sonuç %95 güven seviyesinde 35,621 – 36,665 arasında bulunmuştur. RTFOT öncesi yapılan yumuşama noktası optimum seviyesinin %95 güven aralığı içerisinde olduğu belirlenmiştir (Tablo 14). Şekil 16 incelendiğinde, optimum durumda grafen oranının 3. seviyesi olan %1,5'te yumuşama noktası en yüksek değere ulaşmıştır. Grafenin bitümü sertleştirdiği bilinmektedir. Yapılan optimizasyon sonucu bunu desteklemektedir. Optimum durumda karıştırma hızının 1. seviyesi olan 1000 rpm elde edilmiştir. Yapılan varyans analizinde karıştırma hızının yumuşama noktası üzerinde etkisinin çok az olduğu görülmüştür. Varyans analizi yardımıyla oluşturulan Tablo 14'te, parametrelerin yumuşama noktası üzerine etkileri verilmiştir. Tablo 14'ten de görüleceği üzere yumuşama noktası üzerine etkisi en az olan parametre karıştırma hızı olmuştur. Optimum durumda karıştırma süresinin 3. seviyesi olan 60 dakika bulunmuştur. Karıştırma grafenin mikser içerisine toz halinde katılması ile yapılmıştır. Yapılan gözlemlerde, deneyin başlangıç olan ilk 30 dakikalık kısımda grafen bitüm ile tam olarak karışmamış, ancak karıştırma süresi arttıkça nano boyutta olan grafenin topaklanması azalmış ve daha homojen bir karışım elde edilmiştir.

RTFOT sonrası yumuşama noktası için elde edilen değerler Tablo 11 ve Şekil 17'de verilmiştir. Şekil 17 incelendiğinde, yumuşama noktasını maksimum yapan optimum durum için Grafen miktarının 3. seviyesi olan %1,5 oranı, karıştırma hızının 1. seviyesi olan 1000 rpm ve karıştırma süresinin 3. seviyesi olan 60 dakika (A3 B1 C3) bulunmuştur. Optimum durumdaki deney kombinasyonu olan A3 B1 C3 Tablo 5'te verilen deney planında bulunmamaktadır. Aslında bir nokta tahmin olan bu değer doğru olup olmadığını anlayabilmek için A3 B1 C3 kombinasyonunda doğrulama deneyi yapılarak %5 hata seviyesinde güven aralığı içine girip girmediği kontrol edilmelidir. Yapılan doğrulama deneyi yaklaşık 73,2 °C (S/N:37,29) olarak bulunmuştur. Bu sonuç %95 güven seviyesinde 36,934 – 37,994 arasında bulunmuştur. RTFOT sonrası yapılan yumuşama noktası optimum seviyesinin %95 güven aralığı içerisinde olduğu belirlenmiştir (Tablo 15). Şekil 17 incelendiğinde, RTFOT öncesinde olduğu gibi optimum durumda grafen oranının 3. seviyesi olan %1,5'te yumuşama noktası en yüksek değere ulaşmıştır. Optimum durumda karıştırma hızının 1. seviyesi olan 1000 rpm elde edilmiştir. Varyans analizi yardımıyla oluşturulan Tablo 15'te, parametrelerin yumuşama noktası üzerine etkileri verilmiştir. İlgili tablodan da görüleceği üzere karıştırma hızı 0,256 katkı oranı ile yumuşama noktası üzerinde en az etkisi olan parametre olduğu görülmüştür. Optimum durumda karıştırma süresinin 3. seviyesi olan 60 dakika bulunmuştur.

Penetrasyon deneyi için taguchi metodunun uygulanması

Tablo 16. Taguchi Metoduna Göre Penetrasyon Deney Sonuçları

Deney No	Performans İstatistiği (S/N)	
	RTFOT öncesi	RTFOT sonrası
1	37,673	48,80
2	37,752	49,70
3	37,685	47,60
4	37,278	48,10
5	36,976	46,50
6	37,513	48,80
7	36,802	44,20
8	37,106	43,90
9	37,025	43,40

Tablo 17. Penetrasyon Deneyi Ortalama S/N etkileri- RTFOT Öncesi

	Grafen	Kar. Hızı	Kar. Süre
1. Seviye	37,703	37,251	37,431
2. Seviye	37,256	37,278	37,352
3. Seviye	36,978	37,408	37,154

Tablo 18. Penetrasyon Deneyi Ortalama S/N Etkileri- RTFOT Sonrası

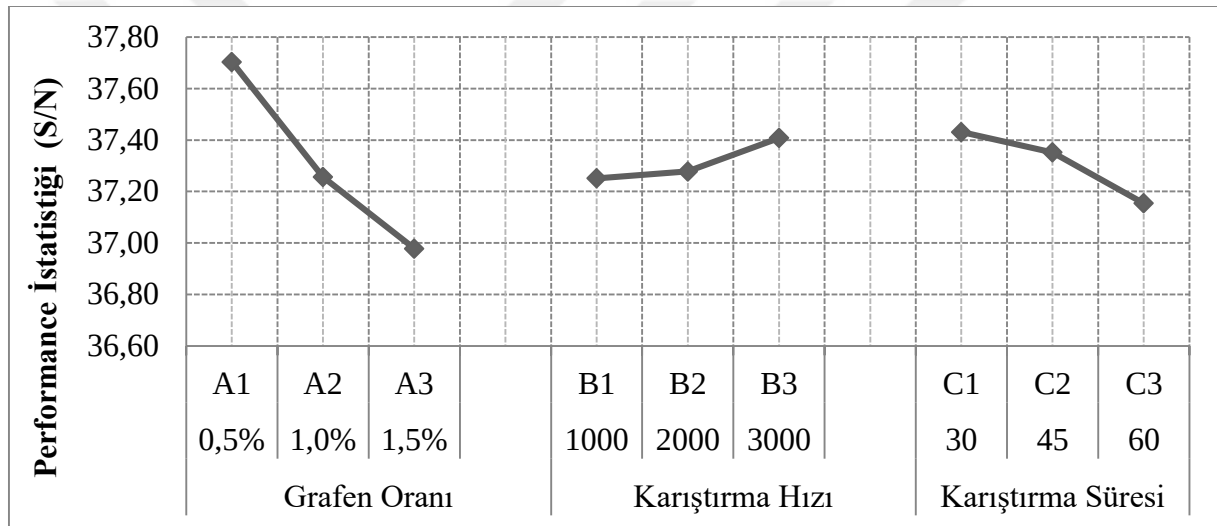
	Grafen	Kar. Hızı	Kar. Süre
1. Seviye	34,053	33,744	33,766
2. Seviye	33,587	33,375	33,440
3. Seviye	32,836	33,357	33,270

Tablo 19. Penetrasyon Değerini Optimum Yapan Koşullar ve Performans Tayini- RTFOT Öncesi

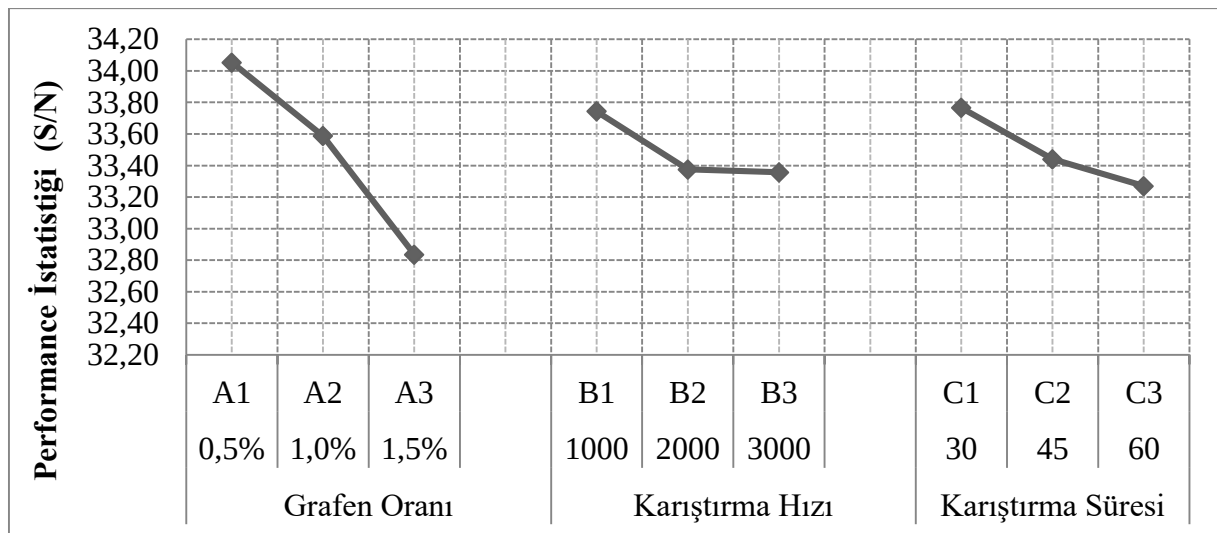
Faktörler	Seviye No	S/N' e Olan Katkısı
Grafen	1	0,391
Kar. Hızı	3	0,096
Kar. Süre	1	0.119
Tüm Faktörlerin Katkısı (S/N)		0,606
Ortalama Performans İstatistiği (S/N)		37,312
Optimum Şartlarda Beklenen Değer (S/N)		37,918
Doğrulama Deneyi Sonucu (S/N) /(0.1 mm)		38.11 / 80,40
Güven Aralığı ($\alpha=95\%$) (S/N)		37,658 – 38,178

Tablo 20. Penetrasyon Değerini Optimum Yapan Koşullar ve Performans Tayini- RTFOT Sonrası

Faktörler	Seviye No	S/N' e Olan Katkısı
Grafen	1	0,561
Kar. Hızı	1	0,252
Kar. Süre	2	0,274
Tüm Faktörlerin Katkısı (S/N)		1,087
Ortalama Performans İstatistiği (S/N)		33,492
Optimum Şartlarda Beklenen Değer (S/N)		34,579
Doğrulama Deneyi Sonucu (S/N) /(0.1 mm)		34,870 / 55,4
Güven Aralığı ($\alpha=95\%$) (S/N)		34,137 – 35,021



Şekil 18. Parametrelerin penetrasyon üzerinde etkisi- RTFOT öncesi



Şekil 19. Parametrelerin penetrasyon üzerinde etkisi- RTFOT sonrası

Penetrasyon deneyinin değerlendirilmesi

Tablo 5’te verilen parametre ve seviyelerine göre hazırlanan numune üzerinde yapılan penetrasyon deneylerinden elde edilen S/N değerleri Tablo 16’da verilmiştir. Tablo 16 yardımıyla elde edilen ortalama S/N etkileri Tablo 17 ve 18’de verilmiştir. Bu tablolardaki maksimum değerler yumuşama noktası için optimum değerlerdir. Bu değerler yardımıyla parametrelerin penetrasyon üzerindeki etkileri Şekil 18 ve 19’da verilmiştir.

Şekil 18 (RTFOT öncesi) incelendiğinde, yumuşama noktasını maksimum yapan optimum durum için Grafen miktarının 1. seviyesi olan %0,5 oranı, karıştırma hızının 3. seviyesi olan 3000 rpm ve karıştırma süresinin 1. seviyesi olan 30 dakika (A1 B3 C1) olduğu belirlenmiştir. Optimum durumdaki deney kombinasyonu olan A1 B3 C1 Tablo 5’te verilen deney planında bulunmamaktadır. Bu değer aslında bir nokta tahmindir. Yapılan tahminin doğru olup olmadığını anlayabilmek için A3 B1 C3 kombinasyonunda doğrulama deneyi yapıp %5 hata seviyesinde güven aralığı içine girip girmediği kontrol edilmelidir. Yapılan doğrulama deneyi yaklaşık 80,4 (S/N:38,110) olarak bulunmuştur. Bu sonuç %95 güven seviyesinde 37,658 – 38,178 arasında bulunmuştur. Dolayısıyla, RTFOT öncesi yapılan penetrasyon deneyleri için optimum seviyeyi veren kombinasyonun %95 güven aralığı içerisinde olduğu söylenebilir (Tablo 19). Şekil 18 incelendiğinde, optimum durumda grafen oranının 1. seviyesi olan %0,5’te penetrasyon en yüksek değere ulaşmıştır. Grafenin bitümü sertleştirdiği daha önceki sonuçlarda da belirlenmiştir. Optimum durumda karıştırma hızının 3. seviyesi olan 3000 rpm elde edilmiştir. Varyans analizi yardımıyla oluşturulan Tablo 19’da, parametrelerin penetrasyon üzerine etkileri verilmiştir. Tablo 19’dan da görüleceği üzere penetrasyon üzerine etkisi en az olan parametre 0,096’lık katkı oranıyla karıştırma hızı olmuştur. Optimum durumda karıştırma süresinin 1. seviyesi olan 30 dakika bulunmuştur.

RTFOT sonrası penetrasyon için elde edilen S/N değerleri Tablo 16 ve Şekil 20’de verilmiştir. Şekil 19 incelendiğinde, penetrasyonu maksimum yapan optimum durum için Grafen miktarının 1. seviyesi olan %0,5 oranı, karıştırma hızının 1. seviyesi olan 1000 rpm ve karıştırma süresinin 1. seviyesi olan 30 dakika (A1 B1 C1) bulunmuştur. Optimum durumdaki deney kombinasyonu olan A1 B1 C1 Tablo 5’te verilen deney planında bulunmamaktadır. A1 B1 C1 kombinasyonunda yapılan doğrulama deneyinin %5 hata seviyesinde güven aralığı içine girip girmediği kontrol edilmiştir. Yapılan doğrulama deneyi yaklaşık 55,4 0,1 mm (S/N:34,870) olarak bulunmuştur. Bu sonuç %95 güven seviyesinde 34,137 – 35,021 arasında bulunmuştur (Tablo 20).

Düktilite Deneyi İçin Taguchi Metodunun Uygulanması

Tablo 21. Taguchi Metoduna Göre Düktilite Deney Sonuçları

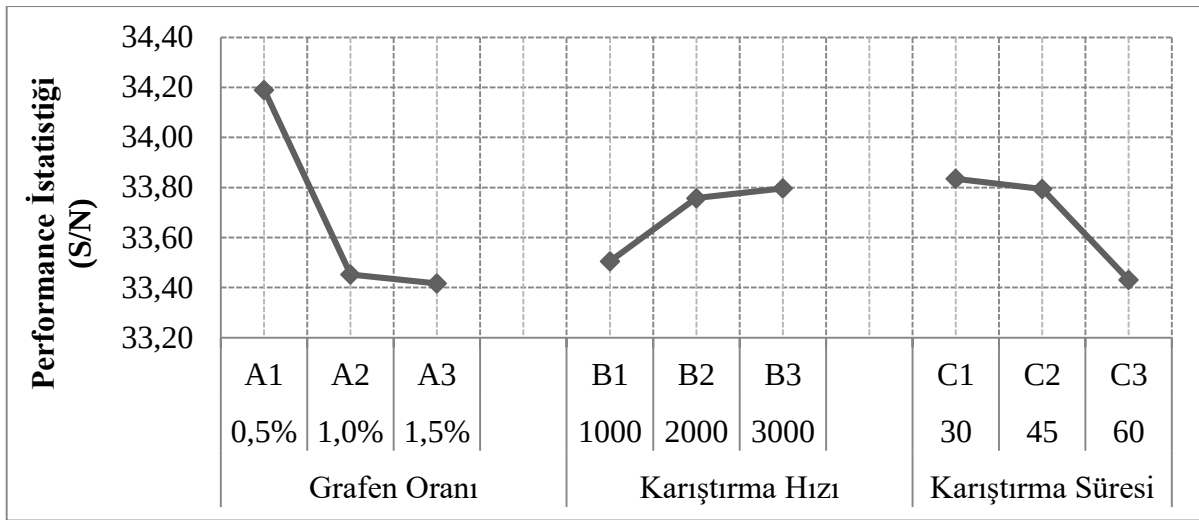
Deney No	Performans İstatistiği (S/N)
1	34,236
2	34,337
3	33,997
4	33,330
5	33,349
6	33,679
7	32,948
8	33,589
9	33,715

Tablo 22. Düktilite Deneyi Ortalama S/N Etkileri

	Grafen	Kar. Hızı	Kar. Süre
1. Seviye	34,190	33,505	33,835
2. Seviye	33,453	33,758	33,794
3. Seviye	33,417	33,797	33,431

Tablo 23. Düktilite Değerlerini Optimum Yapan Koşullar ve Performans Tayini

Faktörler	Seviye No	S/N' e Olan Katkısı
GRAFEN	1	0,503
KAR. HIZI	3	0,110
KAR. SÜRE	1	0,148
Tüm Faktörlerin Katkısı (S/N)		0,761
Ortalama Performans İstatistiği (S/N)		33,687
Optimum Şartlarda Beklenen Değer (S/N)		34,448
Doğrulama Deneyi Sonucu (S/N) /(0.1 mm)		34,60 / 53,70
Güven Aralığı ($\alpha=95\%$) (S/N)		34,204 – 34,692



Şekil 20. Parametrelerin düktilite üzerinde etkisi

Düktilite deneyinin değerlendirilmesi

Tablo 5’te verilen parametre ve seviyelerine göre hazırlanan numune üzerinde yapılan düktilite deneylerinden elde edilen S/N değerleri Tablo 21’de verilmiştir. Tablo 21 yardımıyla elde edilen ortalama S/N etkileri Tablo 22’de verilmiştir. Bu tablodaki maksimum değerler düktilite için optimum değerlerdir. Bu değerler yardımıyla parametrelerin düktilite üzerindeki etkileri Şekil 20’de verilmiştir.

Şekil 20 incelendiğinde, düktiliteyi maksimum yapan optimum durum için Grafen miktarının 1. seviyesi olan %0,5 oranı, karıştırma hızının 3. seviyesi olan 3000 rpm ve karıştırma süresinin 1. seviyesi olan 30 dakika (A1 B3 C1) olduğu belirlenmiştir. Optimum durumdaki deney kombinasyonu olan A1 B3 C1 Tablo 5’te verilen deney planında bulunmamaktadır. Aslında nokta tahmini olan bu değer doğru olup olmadığını anlayabilmek için A3 B1 C3 kombinasyonunda doğrulama deneyi yapıp %5 hata seviyesinde güven aralığı içine girip girmediği kontrol edilmiştir ve yapılan doğrulama deneyi yaklaşık 53,70 (S/N:34,60) olarak belirlenmiştir. Bu sonuç %95 güven seviyesinde 32,204 – 34,692 arasında bulunmuştur. Bunun sonucu olarak da düktilite deneyleri için optimum seviyeyi veren kombinasyonun %95 güven aralığı içerisinde olduğu söylenebilir (Tablo 23). Şekil 20 incelendiğinde, optimum durumda grafen oranının 1. seviyesi olan %0,5’te düktilite en yüksek değere ulaşmıştır. İlgili şekile bakıldığında grafen katkı oranı arttıkça düktilite değerlerinde azalma olduğu görülmektedir. Bu sonuç da grafen ilavesinin daha önceki deney sonuçlarında olduğu gibi bitümü sertleştirdiğini göstermiştir. Optimum durumda karıştırma hızının 3. seviyesi olan 3000 rpm elde edilmiştir. Varyans analizi yardımıyla oluşturulan Tablo 23’de, parametrelerin düktilite üzerine etkileri verilmiştir. Tablo 23’den de görüleceği üzere düktilite üzerine etkisi en az olan parametre 0,110’luk katkı oranıyla karıştırma hızı olmuştur. Optimum durumda karıştırma süresinin 1. seviyesi olan 30 dakika bulunmuştur.

Bitümün Sıcaklığa Duyarlılığının Değerlendirilmesi

Bitümlü bağlayıcılar sıcaklığa hassas bir yol malzemesidir. Sıcaklığa olan bu duyarlılık ise penetrasyon indeksi (PI) ile ölçülmektedir. PI standart olarak yapılan penetrasyon ve yumuşama noktası deneyleri kullanılarak aşağıdaki formül yardımıyla belirlenmektedir.

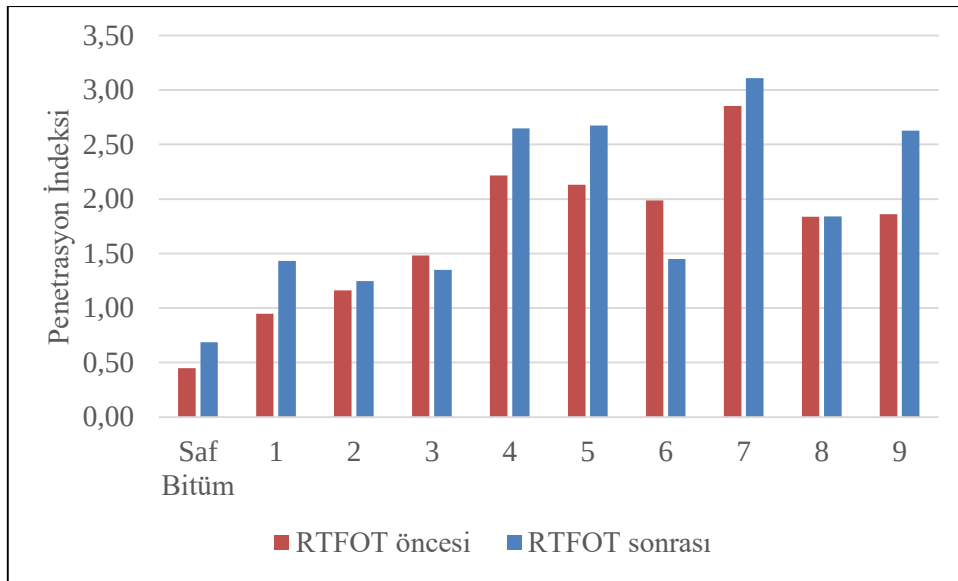
$$A = \frac{\log 800 - \log P_{25}}{T_{YN} - 25} \quad PI = \frac{20 - 500A}{1 + 50A}$$

Burada; P_{25} bitümün 25°C’de penetrasyon değeri, T_{YN} ise yumuşama noktasıdır. Bitümlü bağlayıcıların PI değeri arttıkça sıcaklığa karşı duyarlılıkları azalmaktadır. PI değerinin -2’den küçük çıkması durumu bitümün sıcaklığa çok duyarlı olması, +2’den büyük çıkması durumu ise sıcaklığa karşı az duyarlı olması demektir (Ullidtz, 1987).

Saf bitüm ve L9 ortogonal dizisine göre yaşlandırma öncesi ve sonrası yapılan penetrasyon ve yumuşama noktası değerleri kullanılarak elde edilen PI değerleri Tablo 24 ve Şekil 23’te verilmiştir.

Tablo 24. Penetrasyon İndeksi

	Saf Bitüm	1	2	3	4	5	6	7	8	9
RTFOT öncesi	0,45	0,95	1,16	1,48	2,22	2,13	1,99	2,85	1,84	1,86
RTFOT sonrası	0,69	1,43	1,25	1,35	2,65	2,67	1,45	3,11	1,84	2,63



Şekil 21. Penetrasyon indeksi

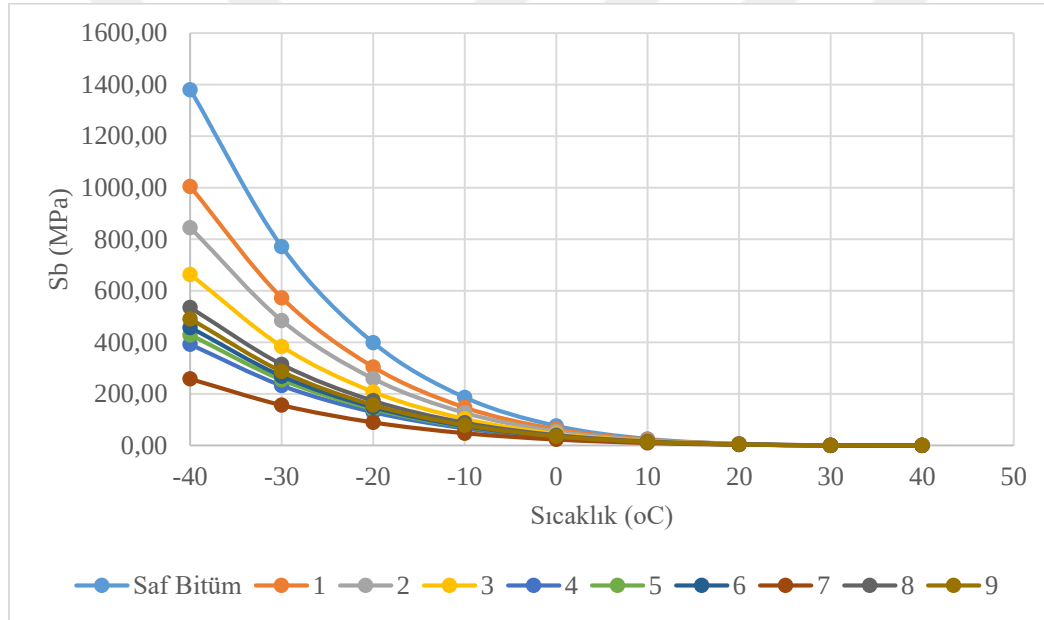
Tablo 24 ve Şekil 25 incelendiğinde saf bitümün penetrasyon indeksi değeri 0,45 olarak bulunurken %0,5 grafen katkısı ile ortalama olarak 1,20, %1,0 grafen oranında bu değer

ortalama olarak 2,11 ve %1,5 grafen katılmasıyla ortalama olarak 2,18 penetrasyon indeksi değeri elde edilmektedir. Grafen katkı oranı arttıkça PI değeri artmakta dolayısıyla sıcaklığa karşı hassasiyet de azalmaktadır.

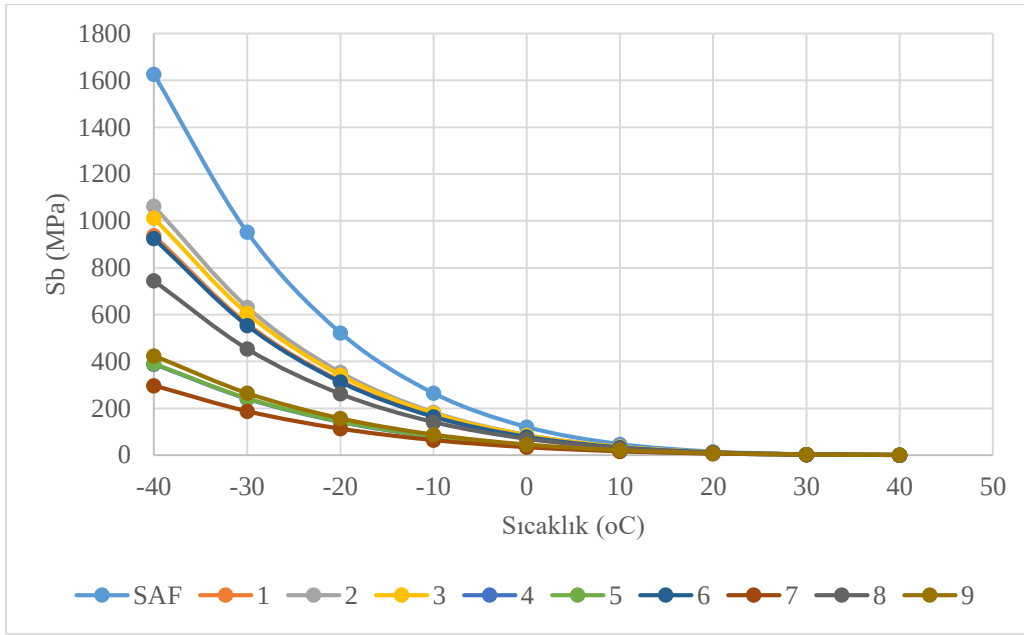
Bitümün sıcaklığa karşı hassasiyetine ek olarak bitüm rijitliğinin tespit edilmesi için Van der Poel tarafından ortaya konulan aşağıdaki eşitlik kullanılmıştır(Sayın ve Tanyıldızı 2006).

$$S_b = 1,157 * 10^{-7} * t_w^{-0,368} * e^{-PI} * (T_{RB} - T)^5$$

Burada, S_b bitümün elastik rijitliği (MPa), t_w ise yükün etki (s) süresidir. Yükün etki süresi araç hızına bağlı olarak 0,1 s ile 0,01 s arasında değişebilmektedir. Bu çalışmada bu değer 0,05 olarak alınmıştır. Sıcaklık değerleri -40°C ile +40 °C arasında seçilmiştir. Elde edilen değerlere ait grafik Şekil 25'te verilmiştir.



Şekil 22. RTFOT öncesi bitümün elastik rijitliğinin sıcaklık ile değişimi



Şekil 23. RTFOT sonrası bitümün elastik rijitliğinin sıcaklık ile değişimi

Bitümlü bağlayıcının özellikleri sıcaklığa bağlı olarak değişmektedir. Bitümün termoplastik davranışından dolayı yüksek sıcaklıklarda yumuşarken düşük sıcaklıklarda sertleşmektedir. Sıcaklıktan dolayı bitümün özelliklerinde meydana gelen bu değişim sıcaklık hassasiyeti olarak tanımlanmaktadır. Sıcaklığa hassasiyetin yüksek olması üstyapı yapımı için tercih edilmemektedir. Çünkü sıcaklık hassasiyeti fazla olan bitümler yüksek sıcaklıklarda çok yumuşarken düşük sıcaklıklarda ise çok kırılgan olmaktadır. Şekil 26 ve 27 incelendiğinde, saf bitümün sıcaklığa olan hassasiyeti daha fazla olduğu, dolayısıyla düşük sıcaklıklarda daha kırılgan olduğu belirlenmiştir. Grafen miktarının artmasıyla sıcaklığa karşı hassasiyetin azaldığı ve bunun sonucu olarak da düşük sıcaklıklarda kırılganlığın azaldığı belirlenmiştir.

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Karayolları Genel Müdürlüğü verilerine göre Türkiye’de 3.523 km’si otoyol, 30.974 km’si devlet yolu 24.136 km’si il yolu olmak üzere toplamda 68.663 km yolağı vardır. Bu yollarının yaklaşık olarak %95’i esnek yollardan oluşmaktadır. Aynı zamanda Türkiye’de yolcu taşımacılığının yaklaşık olarak %95,2’si yük taşımacılığının ise %89,2’si karayolu ile yapılmaktadır. Karayollarının bu kadar yoğun kullanılması, üzerine gelen yüklerin tekerrür sayılarını artırmakta ve daha çabuk bozulmalarına neden olmaktadır. Bu da araştırmacıların daha dayanıklı ve uzun ömürlü üstyapı tasarımlarını teşvik etmiştir. Bunun için gerek bitümün modifiyesi gerekse modifiye edilmiş bitümlerle yapılan karışımlar uzun yıllardır araştırma konusu olmuştur.

Araştırmacılar, üstyapının servis ömrünü uzatmak ve çabuk bozulmasını önlemek için bitümü farklı katkı malzemeleriyle modifiye etmektedir. En çok kullanılan katkı malzemelerinden bazıları stiren bütadienestiren, stiren-buadienerubber, polietilen, epoksi reçine, etil vinil asetat, nanoklay partikülleri, poliolefinler olarak bilinmektedir. Bu çalışmada ise yeni nesil asfalt bağlayıcılarından biri olan grafen kullanılmıştır. Bir karbon allotropu olan grafen, iki boyutlu yapıda ve tabaka halindeki bir malzemedir. Yapısında bulunan karbon atomlarının iki boyutlu altıgen bir yapıda dizilmiş bu formunun grafene hayal edilemeyecek pozitif özellikler sağladığı göz önüne koyulmuştur. Bu malzeme, günümüzde herkesin bildiği en sağlam malzeme olan çelikten 100 – 300 kat daha sağlam, esnek ve saydam özelliğine ek olarak bilinen en hafif ve ince malzeme olarak da literatürde yer edinmiştir.

Yaşlandırma öncesi yapılan penetrasyon deneylerine göre saf bitümün penetrasyon değeri ortalama olarak 85,3 bulunmuştur. Grafen katkısı ile bu değer 67,7 – 77,80 arasında değişmektedir. Sonuçlar irdelendiğinde penetrasyon değerinde %8,8 - 20,6 arasında bir düşüş belirlenmiştir. En fazla düşüşün %1,5 grafen oranında olduğu görülmüştür.

RTFOT ile yaşlandırıldıktan sonra saf bitümün penetrasyon değeri 49,3 olarak bulunmuştur. Yaşlanma sonrası penetrasyonda %42 oranında azalma meydana gelmiştir. Grafen katılması sonucunda ise penetrasyonda %34-44 arasında azalma meydana gelmiştir.

RTFOT öncesi yapılan yumuşama noktası deneylerine göre saf bitümün yumuşama noktası değeri 51 °C bulunmuştur. Grafen katkısı ile bu değer 54,30 – 60,70 arasında değişmektedir. Sonuçlara bakıldığında yumuşama noktası değerinde %6 - 21 arasında bir artış belirlenmiştir. En fazla artışın %1,5 grafen oranında olduğu görülmüştür.

RTFOT ile yaşlandırıldıktan sonra saf bitümün yumuşama noktası değeri 58,5 olarak bulunmuştur. Yaşlanma sonrası yumuşama noktasında %12,8 oranında artış meydana gelmiştir. Grafen katılması sonucunda ise yumuşama noktasında %6-20 arasında artış meydana gelmiştir.

Karayolları teknik şartnamesinde parlama noktası için 220 °C'den yüksek olması istenmektedir. Gerek saf bitümde gerekse grafen ile modifiye edilmiş bitümde bu sıcaklığın üstünde değerler elde edilmiştir. Dolayısıyla bitümün grafen ile modifiye edilmesinin parlama noktası açısından herhangi bir sakıncası görülmemiştir.

Saf bitüm ile yapılan düktilite deneyinden ortalama 54,5 cm'lik sonuç elde edilmiştir. Grafen ilave edildikçe düktilite değerlerinde bitümün sertleşmesine bağlı olarak düşüşler gözlemlenmiştir. Düşüş miktarları %5,5 - %13,7 arasında değişmektedir. Ayrıca grafen miktarı arttıkça düktilitenin ters orantılı olarak azaldığı belirlenmiştir. En fazla azalma %1,5 grafen katkısıyla elde edilmiştir.

RTFOT ile yapılan kısa dönem yaşlanmasına göre saf bitümde %0,74'lük bir kütle kaybı meydana gelmiştir. Yaşlanma sonrası meydana gelen kütle kaybı grafen eklenmesiyle artmasına karşın grafen miktarı arttıkça azalma meydana gelmiştir. %0,5 ve %1 grafen katkısıyla kütle kayıpları yaklaşık olarak sırasıyla %13 ve %3 oranında artarken %1,5 katkı oranında %3 oranında azalmıştır.

Bitüm termoplastik bir malzeme olduğundan göstereceği performans üzerine sıcaklığın etkisi büyüktür. Saf bitüm ile grafen modifiyeli bitümler karşılaştırıldığında, grafen ile modifiye edilen bitümlerin sıcaklığa karşı hassasiyetlerinin daha düşük olduğu belirlenmiştir. Yine elastik rijitliklerine bakıldığında özellikle düşük sıcaklıklarda grafen ile modifiye edilmiş bitümün kırılma enerjisinin daha az olduğu görülmüştür.

Grafen ile modifiye edilmiş bitümün optimum miktarını belirleyebilmek için Taguchi Optimizasyonu kullanılmıştır. Burada amaç bitüme hangi oranda grafenin katılması gerektiğini belirleyebilmektir. Taguchi metoduna göre en büyük en iyi, en küçük en iyi ve nominal en iyi olmak üzere üç tane performans istatistiği vardır. Yapılan çalışmanın durumuna göre bu üç istatistikten bir tanesi seçilebilmektedir. Bu çalışmada en büyük en iyi performans istatistiği seçilmiştir. Dolayısıyla yapılan deney sonuçlarının en büyük olması en iyi durum olarak tercih edilmiştir.

Yapılan Taguchi optimizasyonlarında RTFOT öncesi penetrasyon için A1 B3 C1 parametre seviyeleri optimum penetrasyon değerini vermiştir. Burada grafenin en düşük oranı olan %0,5, 3000 rpm ve 30 dakikalık karışımla en yüksek değer elde edilmiştir. Penetrasyon üzerinde en büyük katkısı olan parametrenin 0,391'lik değeri ile grafen miktarı olduğu

belirlenmiştir. Bunu sırasıyla karıştırma süresi ve karıştırma hızı izlemiştir. Ancak karıştırma hızının etkisinin penetrasyon üzerinde çok az olduğu yani 1000 rpm ile 3000 rpm arasında herhangi bir seviyenin kullanılabileceği görülmüştür. RTFOT sonrası yapılan penetrasyon için A1 B1 C1 deney kombinasyonu maksimum penetrasyon değerini vermiştir. Yine yaşlandırma sonrası yapılan penetrasyon deneyi için en büyük katkı 0,561'lik değeri ile grafen oranı olmuştur. Bunu sırasıyla karıştırma süresi ile karıştırma hızı izlemiştir.

Uygulanan Taguchi optimizasyonlarında RTFOT öncesi yumuşama noktası için A3 B1 C3 parametre seviyeleri optimum yumuşama noktası değerini vermiştir. Burada grafenin en yüksek oranı olan %1,5, 1000 rpm ve 60 dakikada hazırlanan karışımla en yüksek değer elde edilmiştir. Yumuşama noktası üzerinde en fazla etkisi olan parametrenin 0,300'lük değeri ile grafen miktarı olduğu görülmüştür. Bunu sırasıyla karıştırma süresi ve karıştırma hızı izlemiştir. Bununla birlikte, karıştırma hızının yumuşama noktası üzerindeki etkisi çok az olarak belirlenmiştir. RTFOT sonrası yapılan yumuşama noktası için yine aynı kombinasyon olan A3 B1 C3 deney kombinasyonu maksimum yumuşama noktası değerini vermiştir. Yaşlandırma sonrası yapılan yumuşama noktası deneyi için en büyük katkı 0,484'lük değeri ile grafen oranı olmuştur. Bunu sırasıyla karıştırma süresi ile karıştırma hızı izlemiştir.

Taguchi optimizasyonlarında düktilite deneyi için A1 B3 C1 parametre seviyeleri optimum yumuşama noktası değerini vermiştir. Burada grafenin en yüksek oranı olan %0,5, 3000 rpm ve 30 dakikada hazırlanan karışımla en yüksek değer elde edilmiştir. Düktilite üzerinde en fazla katkısı olan parametrenin 0,503'lük değeri ile grafen miktarı olduğu görülmüştür. Bunu sırasıyla karıştırma süresi ve karıştırma hızı izlemiştir. Bununla birlikte, karıştırma hızının düktilite üzerindeki etkisinin çok az olduğu belirlenmiştir.

Bu çalışmada Taguchi Metodu kullanılarak bitüme grafen katkısının miktarı belirlenmeye çalışılmıştır. Karayolları teknik şartnamesinde bulunan bitüm deneyleri üretilen numunelere uygulanmış ve optimum grafen oranı belirlenmiştir. Saf bitüm ile grafen modifiyeli bitümler karşılaştırıldığında, grafen ile modifiye edilen bitümlerin sıcaklığa karşı hassasiyetlerinin daha düşük olduğu belirlenmiştir. Bu da modifiye bitümün yüksek sıcaklıklarda çabuk yumuşamasını engeller, düşük sıcaklıklarda ise daha kırılgan az kırılgan olmasını sağlar. Yine elastik rijitliklerine bakıldığında özellikle düşük sıcaklıklarda grafen ile modifiye edilmiş bitümün kırılganlığının daha az olduğu görülmüştür. Bundan sonraki çalışmalarda, sıcak karışım yapılarak grafen katkısının karışım performansına etkisi araştırılabilir.

KAYNAKÇA

- Al- Hadidy, A.I., 2018. Engineering behavior of aged polypropylene-modified asphalt pavements. *Construction and Building Materials*, 191, 187-192.
- Alataş, T., Yılmaz, M., Kök, B.V., Çeloğlu, M.E., Akpolat, M., Erdoğan Yamaç, Ö., Yalçın, E., 2018. Öğütülmüş Araç Lastiğinin Ve Piroliz İşleminden Sonra Oluşan Karbon Siyahının Bitümlü Bağlayıcıların Reolojik Özellikleri Üzerindeki Etkisi. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 23(1), 311-328.
- Anonim 24.11.2020 <https://www.kyk.com.tr/blogdetay-bitum-bitumlu-kaplamalar-ve-ozellikleri>
- Aravind, S., Isac, A.J. ve Aparajith, S. 2018. Construction of Porous Asphalt Pavement Using Graphene. *International Journal of Recent Trends In Engineering & Research*, 04 (04), 482-486.
- Arslan. D., Gürü, M., Çubuk, M.K., 2011. Bitüm Ve Bitümlü Karışımların Performans Özelliklerinin Organik Esaslı Çinkofosfat Bileşiği İle Geliştirilmesi. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 27 (2), 459-466.
- Avcı, E., 2009. Sıcak İklimli Bölgelerde Kullanılan Asfalt Betonu Karışım Değişkenlerinin Kaplama Tabakası Performansına Etkisi. Y.L. Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Bayrak, O.Ü., 2002. Uçucu Kül Ve Silis Dumanı İçeren Yol Betonu Karışımlarının Bazı Mekanik Özelliklerinin Taguchi Metodu İle Optimizasyonu. Y.Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Bayrak, O.Ü., 2007. Rijit Üstyapı Tasarımına Yeni Bir Yaklaşım. Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Bell, C.A. Sosnovske, D. Wieder, J.A., 1992. Aging, Binder Validation, National Research Council, Washington D.C., 384-385.
- Cai, L., Shi, X., Xue, J., 2018. Laboratory evaluation of composed modified asphalt binder and mixture containing nano-silica/rock asphalt/SBS. *Construction and Building Materials*, 172, 204-211.
- Cuciniello, G., Leandri,P., Polacco,G., Airey, G. and Losa, M. 2020. Applicability of time-temperature superposition for laboratory-aged neat and SBS-modified bitumens. *Construction and Building Materials*, 263(120964).
- Çiftçi, C., Eymirli, E.B., Çakal, M.A., 2016. Tra1 Bölgesi Linyit Ve Oltu Taşı Madenlerinin Grafen Hammaddesi Olarak Kullanımına Yönelik Analiz Çalışması. Erzurum, Erzincan, Bayburt.
- Demirkaya, Ö., Terzi, S., 2017. Karbon Liflerin Bitümlü Sıcak Karışımlarda Kullanımının Araştırılması. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 21(2), 542-548.
- Dong, Z., Zhou, T., Luan, H., Williams, R.C., Wang, P., Leng, Z., 2019. Composite modification mechanism of blended bio-asphalt combining styrene-butadiene-styrene

- with crumb rubber: A sustainable and environmental-friendly solution for wastes. *Journal of Cleaner Production*, 214, 593-605.
- Erkuş, Y., 2017. Grafit Katkısının Bitüm Ve Taş Mastik Asfalt Kaplamaya Etkisinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fırat Üniversitesi, Elazığ.
- Erkuş, Y., Kök, B. V. ve Yılmaz, M. 2020. Evaluation of performance and productivity of bitumen modified by three different additives. *Construction and Building Materials*, 261(120553).
- Feng, Z., Cai, F., Yao, D. and Li, X. 2021. Aging properties of ultraviolet absorber/SBS modified bitumen based on FTIR analysis. *Construction and Building Materials*, 273(121713).
- Gallu, R., Méchin, F., Dalmas, F., Gérard, J. F., Perrin, R. ve Loup, F. 2020. Rheology-morphology relationships of new polymer-modified bitumen based on thermoplastic polyurethanes (TPU). *Construction and Building Materials*, 259(120404).
- Gençtürk, G., 2011. Sönmüş Kireç İle Çimento Ve Pr Plast Kullanımının Asfalt Kaplamaların Mekanik Özellikleri Üzerindeki Etkileri. Y. Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Gökalp, İ., Çetin, H.M., Özinal, Y., Gündoğan, H., Uz, V.E., 2019. Polimer Modifiye Bitüm Modifikasyonuna Etki Eden Parametreler Üzerine Bir Literatür Araştırması. Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 8(2), 954-964.
- Gökalp, İ., Özinal, Y., Uz, V.E., 2018. Atık Bitkisel Yemeklik Yağların Saf Bitüm Özelliklerine Etkisinin Araştırılması. Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 6(4), 570-578.
- Guo, T., Wang, C., Chen, H., Li, Z., Chen, Q., Han, A., Jiang, D. ve Wang, Z. 2019. Rheological properties of graphene/tourmaline composite modified asphalt. *Petroleum Science and Technology*, 37 (21), 2190-2198.
- Ilıcalı, M., Tayfur, S., Özen, H., Sönmez, K., 2001. Asfalt ve Uygulamaları, Yıldız Teknik Üniversitesi Yayın Merkezi Başkanlığı, Seçil Ofset, 280, İstanbul.
- Jiang, Z., Easa, S. M., Hu, C. ve Zheng, X. 2020. Evaluation of new aspect of styrene-butadiene-styrene modified bitumens: Damping property and mechanism. *Construction and Building Materials*, 242(118185).
- Jin, J., Xiao, T., Tan, Y., Zheng, J., Liu, R., Qian, G., Wei, H., Zhang, J., 2018. Effects of TiO₂ pillared montmorillonite nanocomposites on the properties of asphalt with exhaust catalytic capacity. *Journal of Cleaner Production*, 205, 339-349.
- Joohari, I.B. and Giustozzi, F. 2020. Chemical and high-temperature rheological properties of recycled plastics-polymer modified hybrid bitumen. *Journal of Cleaner Production*, 276(123064), 376-392.
- Karcasu, M. 2016. Yol Üstyapı Deneyleri, Eskişehir.
- Kök, B.V., Yılmaz, M., Kuloğlu, N., 2012. Asfaltitin Bitüm ve Bitümlü Sıcak Karışımların Mekanik Özelliklerine Etkisi. İMO Teknik Dergi, 2012(371), 5813-5826.
- Lav, M.H., Lav, M.A., 2004. Shell Bitüm El Kitabı. İSFALT, Bilimsel Yayın No:3, 333 s, İstanbul.
- Navarro, F.M., Sánchez, M.S., Gámiz, F. ve Gámez, M.C.R. 2018. Mechanical and thermal properties of graphene modified asphalt binders. *Construction and Building Materials*, 180, 265-274.

- Nazki, M.A., Chopra, T. ve Chandrappa, A.K. 2019. Rheological properties and thermal conductivity of bitumen binders modified with graphene. *Construction and Building Materials*, 238(117693).
- Oldham, D.J., Rajib, A.I., Onochie, A., Fini, E.H., 2019. Durability of bio-modified recycled asphalt shingles exposed to oxidation aging and extended sub-zero conditioning. *Construction and Building Materials*, 208, 543-553.
- Omairey, E.L., Zhang, Y., Gu F., Mab, T., Hu, P. ve Luo, R. 2020. Rheological and fatigue characterisation of bitumen modified by anti-ageing compounds. *Construction and Building Materials*, 265(120307).
- Özay, O., Arkan Öztürk, E., 2013. Modifiye Edilmiş Poroz Asfalt Karışımların Performansı. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 28 (3), 577-586.
- Öztürk, E.A., Çubuk, M.K., 2004. Karayolu esnek üstyapı tasarımında yeni bir yöntem: Yüksek performanslı asfalt kaplama. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 19(2), 175-184.
- Pavement Performance Trends, 1986. AASHTO Guide for Design of Pavement Structure, Washington D.C.
- Rahman, M.T., Mohajerani, A. ve Giustozzi, F. 2020. Possible use of cigarette butt fiber modified bitumen in stone mastic asphalt. *Construction and Building Material*, 263(120134), 376-392.
- Rasool, R., Hongru, Y., Hassan, A., Wang, S., Zhang, H., 2018. In-field aging process of high content SBS modified asphalt in porous pavement. *Polymer Degradation and Stability*, 155, 220-229.
- Sağlık, A., Güngör, G.A., 2006. Karayolları Esnek Üstyapılar Projelendirme Rehberi, Ankara.
- Sayın, E., Tanyıldızı, H., 2006. Bitümlü Sıcak Karışımların Rijitliğinin Bulanık Mantık İle Bulunması. *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Dergisi*, 21(4), 645-649.
- Shi, X., Cai, L., Xu, W., Fan, J., Wang, X., 2017. Effects of nano-silica and rock asphalt on rheological properties of modified bitumen. *Construction and Building Materials*, 161 (2018), 705-714.
- Sönmez, İ., Deniz, M.T., Tayfur, S., Özen, H., Yıldırım, S.A., Eren, B.K., Modifiye Katkı Maddelerinin Bitümlü Sıcak Karışıma Etkisi Ve Performans Üstünlükleri. 334-348.
- Sun, G., Ma, J., Sun, D., Li, B., Ling, S. ve Lu, T. 2020. Influence of thermal oxidative aging on temperature induced self-healing transition of polymer modified bitumens. *Materials and Design*, 192(108717).
- Tanzadeh, R. and Shafabakhsh, G. 2020. Relationship between the surface free energy and stiffness modulus of bitumen modified with micro-nano-carbon black from end-of-life tires. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 100(102606).
- Tayfur, S., 2001. Taş Mastik Asfalt (SMA) Kaplamaları İçin Uygun Karışımın Araştırılması ve Bir Hizmet Ömrü Modeli Geliştirilmesi. Doktora Tezi Y.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- TC Bayındırlık Bakanlığı, Karayolları Genel Müdürlüğü, 1988. Araştırma Dairesi Başkanlığı, Bitümlü Malzemeler Laboratuvar El Kitabı, Yayın no 239.
- TC Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, 1993. Karayolları Genel Müdürlüğü, Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı, Bitümlü Karışımlar Laboratuvar El Kitabı, Ankara.

- Terzi, S., Alalı, F., 2018. Investigation Of The Use Of Recycled Asphalt Concrete Material To The Surface Layers. Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 6(1), 139-147.
- Tunç, A., 2004. Esnek Kaplama Malzemeleri El Kitabı, Mega Mühendislik Asil Yayıncılık, Ankara.
- Ullidtz, P., 1987. Pavement analysis. Elsevier, 318, Amsterdam.
- Whiteoak, D. ve Read, J., 2003. The Shell Bitumen Handbook (Shell Bitüm El Kitabı), Thomas Telford Ltd, London.
- Yağız, F., Keçeciler, A.F. i Işıksalan, C. ve Akkol, G. 1967, Bitümlü Malzemeler İş Matbaacılık ve Ticaret , Ankara.
- Yavuz, A., 2002. Asfalt El Kitabı. İSFALT, Bilimsel Yayın No: 2, 573 s, İstanbul.
- Yıldırım, Z.B., Karacasu, M., Okur, D.V., 2018. Atık Lastik ve Cam Lif ile Modifiye Edilmiş Bitümün Asfalt Betonu Performansına Etkileri. Afyon Kocatepe University Journal of Science and Engineering, 18(015601), 1019-1027.
- Yılmaz, M., Kök, B.V., 2008. Stiren-Butadien-Stiren Modifiyeli Bitümlü Bağlayıcıların Superpave Sistemine Göre Yüksek Sıcaklık Performans Seviyesinin Ve İşlenebilirliğinin Belirlenmesi. Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der, 23(4), 811-819.
- Zhang, X.L., Guo, Y.D., Su, J.F., Han, S., Wang, Y.Y. ve Tan, Y.Q. 2018. Investigating the electrothermal self-healing bituminous composite material using microcapsules containing rejuvenator with graphene/organic hybrid structure shells. Construction and Building Materials, 187, 1158-1176.
- Zhou, X., Zhang, X., Xu, S., Wu, S., Liu, Q. ve Fan, Z. 2017. Evaluation of thermo-mechanical properties of graphene/carbon-nanotubes modified asphalt with molecular simulation. Molecular Simulation, 43(4), 312-319.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı:	Ayşe ŞİMŞEK
Doğum tarihi:	
Doğum Yeri:	
Uyruğu:	
E-mail:	
Eğitim	
Lise:	Erzurum Mehmet Akif Ersoy Anadolu Lisesi Aşkale İMKB Anadolu Lisesi
Lisans:	Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi
Yüksek lisans:	Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri. Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Yabancı Dil Bilgisi	
İngilizce:	B2 Düzeyinde Sertifika No:0809895
Üye Olunan Mesleki Kuruluşlar	