



## **Bitüm Modifikasyonunda Kullanılan Güncel Katkı Maddeleri: Bir Literatür Araştırması**

### Up To Date Additives Used in Bitumen Modification: A Literature Review

**Aytuğ KUMANDAŞ<sup>1</sup>, Erhan Burak PANCAR<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>İnşaat Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Samsun  
· [aytug.kumandas@omu.edu.tr](mailto:aytug.kumandas@omu.edu.tr) · ORCID > 0000-0003-1765-9963

<sup>2</sup>İnşaat Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Samsun  
· [epancar@omu.edu.tr](mailto:epancar@omu.edu.tr) · ORCID > 0000-0002-7958-3434

#### Makale Bilgisi/Article Information

**Makale Türü/Article Types:** Derleme Makalesi/Review Article

**Geliş Tarihi/Received:** 02 Ocak/January 2023

**Kabul Tarihi/Accepted:** 18 Eylül/September 2023

**Yıl/Year:** 2023 | **Cilt-Volume:** 3 | **Sayı-Issue:** 2 | **Sayfa/Pages:** 109-140

**Atıf/Cite as:** Kumandaş, A., Pancar, B.E. "Bitüm Modifikasyonunda Kullanılan Güncel Katkı Maddeleri: Bir Literatür Araştırması"  
Ondokuz Mayıs Üniversitesi Mühendislik Bilimleri ve Teknolojisi Dergisi 3(2), Eylül 2023: 109-140.

**Sorumlu Yazar/Corresponding Author:** Aytuğ KUMANDAŞ

## BITÜM MODİFİKASYONUNDA KULLANILAN GÜNCEL KATKI MADDELERİ: BİR LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

### ÖZ

Bitümün çeşitli katkı maddeleri ile performansının iyileştirilmesi uzun yıllardan beri kullanılmakta olan bir yöntemdir. Araştırmacılar, yeni katkı maddelerinin üretilmesi veya mevcut katkı maddelerinin kombine edilerek kullanılması üzerine çalışmalar yürütmeye devam etmektedir. Bu çalışmada, bitüm modifikasyonu üzerine son iki yıl içerisinde yazılmış ve ilgili alandaki önemli dergilerde yayınlanmış makaleler derlenerek üzerinde çeşitli incelemeler yapılmıştır. Bu doğrultuda, çalışmaların yürütüldüğü ülkeler, çalışmalarda kullanılan katkı maddeleri ile bunların kullanım sıklıkları, kompozit modifikasyonda birlikte kullanılan katkı maddeleri ve tercih edilen deneysel yöntemler analiz edilmiştir. Böylece, bu alanda çalışmaya başlayacak yüksek lisans veya doktora öğrencileri ve araştırmacılar için güncel bilgileri içerisinde barındıran bir derleme yazılması hedeflenmiştir. Çalışmanın sonucunda, stiren-bütadien-stiren (SBS) katkı maddesinin halen literatürde büyük bir öneme sahip olduğu, bununla birlikte atık maddelerin bitüm modifikasyonunda kullanımının artık çalışmalarda odak noktası haline geldiği görülmüştür. Ayrıca, kompozit modifikasyonun getirdiği faydalar sebebiyle sıklıkla tercih edildiği anlaşılmış olup, deneysel yöntemlerde ise Dinamik Kesme Reometresi (DSR) cihazı ile yürütülen MSCR deneyinin yaygınlaştığı belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Asfalt, Asfalt Kaplama, Bitüm, Bitüm Modifikasyonu.



## UP TO DATE ADDITIVES USED IN BITUMEN MODIFICATION: A LITERATURE REVIEW

### ABSTRACT

Improving the performance of bitumen with various additives is a method that has been used for many years. Researchers continue to work on the production of new additives or the use of existing additives in combination. In this study, articles written in the last two years on bitumen modification and published in important journals in the relevant field were reviewed and various analyzes were made on them. Accordingly, the countries where the studies were carried out, the additives used in the studies and their frequency of use, the additives used together in composite modification and the preferred experimental methods were analyzed. Thus, it is aimed to write a review that contains up-to-date information for graduate or

doctoral students and researchers who will start working in this field. As a result of the study, it was seen that the styrene-butadiene-styrene (SBS) additive still has a great importance in the literature, however, the use of waste materials in bitumen modification has now become the focus of studies. In addition, it has been understood that composite modification is often preferred due to the benefits it brings, and it has been determined that the MSCR experiment carried out with the Dynamic Shear Rheometer (DSR) device has become widespread in experimental methods.

**Keywords:** Asphalt, Asphalt Pavement, Bitumen, Bitumen Modification.

### **Öne çıkanlar**

- SBS katkı maddesi literatürde halen en yaygın kullanılan katkı malzemesidir.
- Atık malzemelerin bitüm modifikasyonunda kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır.
- Farklı katkı maddelerinin birlikte kullanımını içeren çalışmaların sayısı artış göstermektedir.
- MSCR deneyinin tercih edildiği çalışma sayısı artmaktadır.



## **1. GİRİŞ**

Asfalt kaplamalar dünyadaki karayollarının %80'inden fazlasını oluşturmaktadır [1]. Asfalt kaplamaların rijit kaplamalara göre daha çok tercih edilmesinin sebebi yollarda yüksek stabilite, esneklik, su yalıtımı, kullanım kolaylığı ve sürüş konforu sağlamasıdır [2-4]. Bir asfalt karışım; belirli bir gradasyona sahip farklı boyutlu agregalardan, bağlayıcı görevi üstlenen bitümden ve hava boşluklarından oluşur. Bitüm, asfalt karışımın ağırlıkça sadece %5-7'sini veya hacimce yaklaşık %15'ini oluşturur [5]. Bitümlerin büyük çoğunluğu, inşaat endüstrisi tarafından, yol ve çatı kaplamalarında kullanılmaktadır. Üstün su geçirmezlik özelliği ve termoplastik davranışı, onu çok çeşitli uygulamalar için ideal kılmaktadır [6]. Asfalt karışımlardaki bitümün yüzdesi ağırlıkça çok düşük olmasına rağmen bitüm performansının yolun uzun vadeli performansı üzerinde önemli bir etkisi vardır [5, 7-9]. Bu sebeple, asfalt karışımlar üzerinde yürütülen çalışmaların büyük bir çoğunluğu bitüm ile ilgilidir [10].

Bitüm en eski yapı malzemelerinden biridir ve antik çağlardan beri çok değerlidir [11]. Genel olarak bitümler karmaşık bir iç yapıya sahip yapı malzemeleridir. Bitümün kimyası ve iç yapısının araştırılmasında yeni yöntemler ve teknolojiler kullanılmasına rağmen [11-13], iç yapısının anlaşılması halen zordur. Bitümün, asfaltenler ve maltenler ile temsil edildiği ve farklı seviyelerde polarite ve molar kütlelere sahip kompleks bileşiklerin bir koloidal sistemi olduğu kabul edilmektedir [14]. Asfalt karışımlarda kullanılan bitümler, geniş bir sıcaklık rejimi altında yeterli performansı göstermelidirler.

Bitüm, kış aylarındaki düşük sıcaklıklarda oluşan ani gerilmelere karşı çatlamadan dayanacak kadar esnek kalmalı, ancak yaz aylarındaki yüksek sıcaklıklarda yapışma kabiliyetini korumalıdır [15]. Geleneksel bitüm kullanılarak inşa edilen asfalt kaplamalar, çoğu karayolu kaplamalarında ve havaalanı pisti uygulamalarında tatmin edici bir performans sergilemiştir [16]. Ancak, karayolu trafiğinin hacmindeki, dingil yüklerindeki ve tekerlek lastiklerinin basınçlarındaki artış, yetersiz bakım yapılması, iklim koşullarının değişmesi ve inşaat ve tasarım hataları asfalt kaplamaların bozulmasına sebep olarak hizmet ömrünü olumsuz etkilemektedir [16-19]. Bunun yanı sıra, yaşam standartlarındaki artış, sosyal gelişme, mevcut kaynakların yetersizliği ve artan malzeme ve enerji maliyeti karayolu mühendislerini yeni yollar inşa etmeye ve mevcut yolları iyileştirme konusunda yeni alternatifler keşfetmeye yöneltmiştir [20-22].

Bitüm modifikasyonu, bitümün eksikliklerini gidermek ve böylece asfalt kaplamaların performansını arttırmak için bir çözüm sunmaktadır [17, 23]. Bilinen en iyi modifikasyon şekli, bitümün sertliğini, yüksek servis sıcaklıklarında arttırarak ve düşük servis sıcaklıklarında ise azaltarak bitümün sıcaklığa karşı duyarlılığını geliştirmek amacıyla kullanılan polimer modifikasyonudur [23-26]. Polimer modifiyeli bitümler (PMB'ler) kaplamanın tekerlek izine, soyulmaya, yorulma ve ısı etkisiyle meydana gelen çatlaklara karşı direncinin artmasını ve sıcaklık hassasiyetinin azalmasını sağlamaktadır. PMB'ler ile oluşturulan asfalt kaplamalar, yoğun caddelerdeki kavşaklar, havaalanları, araç tartım istasyonları ve yarış pistleri gibi yüksek gerilmelerin meydana geldiği yerlerde başarı ile kullanılmaktadır. Bitümü modifiye etmek için kullanılan polimerler arasında stiren-bütadien-stiren (SBS), stiren-bütadien kauçuğu (SBR), Elvaloy®, kauçuk, etilen-vinil-asetat (EVA), polietilen (PE) ve diğerleri bulunmaktadır [27].

Bu çalışmada, bitüm modifikasyonu ile ilgili yapılan güncel çalışmalar analiz edilerek, bu çalışmaların hangi ülkelerde yürütüldüğü, çalışmalarda hangi katkı malzemelerinin tercih edildiği, hangi katkı maddelerinin birlikte kullanılarak kombine edildiği ve hangi deneysel yöntemlerin kullanıldığı incelenmiştir. Böylece, bu alanda çalışmaya başlayacak olan yüksek lisans veya doktora öğrencilerinin bitüm modifikasyonu konusu hakkında genel ve güncel bilgiye ulaşmaları hedeflenmiştir.

## 2. MATERYAL VE YÖNTEMLER

Bu çalışma, son yıllarda bitüm modifikasyonunda kullanılan güncel katkı malzemeleri hakkında bir literatür araştırmasıdır. Buna ilaveten, son yıllarda yapılan çalışmalardaki bağlayıcıların özelliklerinin değerlendirilmesinde kullanılan deney yöntemleri de incelenmiştir. Böylece, bu alanda çalışmaya başlayacak yüksek lisans ve doktora öğrencilerinin konu ile ilgili güncel bilgilere pratik yolla ulaşılması hedeflenmiştir.

Literatür tarama işlemi sistematik bir şekilde gerçekleştirilmiş olup bu hususta izlenen adımlar özet halinde Şekil 1'deki diyagramda verilmiştir. Bu şekilde çalışma yürütülürken dikkat edilen 8 adım özet halinde verilmiş olup bu adımlar bu çalışmanın metodolojisini oluşturmaktadır.

Çalışmanın birinci adımında kullanılacak makale veri tabanı belirlenmiştir. Çalışmanın konusunun sınırları ile ulaşılacak makale sayısı doğrudan ilişkilidir. Bu çalışmanın konusu olan bitüm modifikasyonunda kullanılan katkı malzemeleri, oldukça genel bir konudur. Dolayısıyla, kullanılacak makale veri tabanının "Google Scholar" veya "Web of Science" gibi içerisinde konu ile ilgili çok fazla dergiyi barındıran bir veri tabanı olması ulaşılacak makale sayısının binden fazla olabileceği anlamına gelmektedir. Bu sebeple öncelikle makaleleri seçmek için dergiler belirlenmiştir. Dergi seçiminde ise ilgili alandaki dergilerin etki faktörleri ve hangi çeyreklikte kaldıklarına dikkat edilmiştir. Bu doğrultuda, 3 adet dergi seçilmiş olup bunlar, ilgili alandaki en saygın, etki değerleri en yüksek ve birinci çeyrek kalitesindeki dergilerdir.

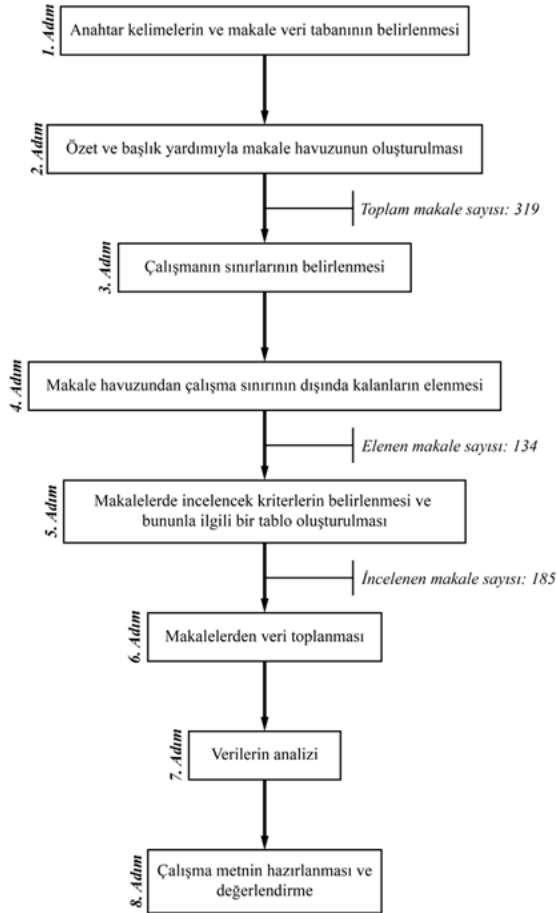
Makale havuzuna ilave edilecek makale sayısının, çok fazla olması istenmeyen bir olgudur. Bu durum, makalelerin incelenmesini zorlaştırmaktadır. Bu sebeple, birinci adım içerisinde yukarıda belirtilen makale veri tabanının 3 dergi ile kısıtlanmasına ek olarak hem güncellik hem de makale sayısının kısıtlanması açısından, dergilerin belirli bir zaman diliminde yayınlanmış makalelerinin incelenmesinin doğru olacağı düşünülmüştür. Bu doğrultuda, iki haftada bir sayı çıkaran ve her sayısında yaklaşık 30-40 makale bulunan dergi için son 1 yılda yayınlanmış makaleler dikkate alınırken, ayda bir sayı ve bir sayıda 20-30 makale çıkaran diğer iki dergi için son 2 yılda yayınlanmış makaleler dikkate alınmıştır.

Buna ilaveten çalışma konusu hali hazırda genel bir konu olduğu için anahtar kelimelerde kısıtlamaya gidilmemiş, "bitumen modification", "asphalt modification", "bitumen", "asphalt" kelimeleri anahtar kelimeler olarak tercih edilmiştir.

Makale veri tabanını ve hangi zaman dilimi için makalelerin inceleneceği kesinleştikten sonra ikinci adıma geçilmiştir. Bu adımda, dergilerin yayınlanmış sayıları tek tek incelenmiştir. İnceleme esnasında, makale özet ve başlıklar okunmuş

içerisinde anahtar kelimelerden herhangi birini barındıran veya çalışma konusu ile ilgili olabileceği düşünülen makaleler, makale havuzuna eklenip kodlanmıştır. Hedef dergilerin belirlenen yıllar içerisinde yayınlamış oldukları sayıların incelenmesi tamamlandıktan sonra makale havuzundaki makale sayısı 319 olarak kaydedilmiştir.

Üçüncü adımda, makale havuzundaki makale sayısının bir miktar daha azaltılması amacıyla çalışmanın sınırlandırılması gerektiği düşünülmüş ve bu doğrultuda çalışmaya yeni sınırlar getirilmiştir. Sonuç olarak, bu çalışma içerisine; sadece bitüm modifikasyonunu inceleyen ve geleneksel bitüm deneyleri ile dünya genelinde kabul görmüş standartlara sahip bağlayıcı deneylerinin kullanıldığı çalışmalar dahil edilmiştir.



Şekil 1. Çalışmada izlenen metodoloji.

Dördüncü adımda, bir önceki adımda belirlenen sınırlar dikkate alınarak makale havuzunda eleme yapılmıştır. Bu doğrultuda, farklı bir metodolojiye sahip 40 makale, asfalt karışımının doğrudan modifiye edilmesini inceleyen 39 çalışma, geri dönüştürülmüş asfalt veya gençleştirme inceleyen 37 çalışma, derleme niteliğindeki 9 çalışma, bitüm emülsiyonu inceleyen 5 çalışma ve diğer sebeplerden dolayı 4 çalışma makale havuzundan çıkarılmıştır. Böylece toplamda 134 adet makale, makale havuzundan çıkarılmış ve makale havuzunda incelenecek toplam 185 adet makale kalmıştır.

Beşinci adımda, makalelerin incelenmesinde bir yol gösterici olarak kullanılacak bir şablon tablo hazırlanmıştır. Bu tablo içerisindeki sorulara makale içerisinden cevaplar bulunarak bu çalışma için gerekli bilgiler derlenmiştir. Bu doğrultuda, makalenin hangi ülkedeki araştırmacılar tarafından yazıldığı, genel amacının ne olduğu, incelenen özelliklerinin ne olduğu, kullanılan katkı malzemelerinin isimleri, katkı malzemesinin yüzde kaç oranda kullanıldığı, kompozit modifikasyona yer verilip verilmediği ve kullanılan deneysel yöntemlerin neler olduğu sorularını içeren bir tablo hazırlanmıştır.

Altıncı adımda, bir önceki adımda hazırlanan tablo makalelerden edinilen bilgilere göre doldurulmuştur. Böylece çalışmanın temelini oluşturan veri seti hazırlanmıştır. Bu adımı takiben yedinci adımda ise, toplanan veriler düzenlenip analiz edilerek bu çalışmanın metninden kullanılmak üzere grafikler halinde sunulmuştur. Sekizinci ve son adımda ise, yapılan çalışmanın metni hazırlanmış elde edilen analiz sonuçlarına göre literatürün mevcut durumu değerlendirilmiştir.

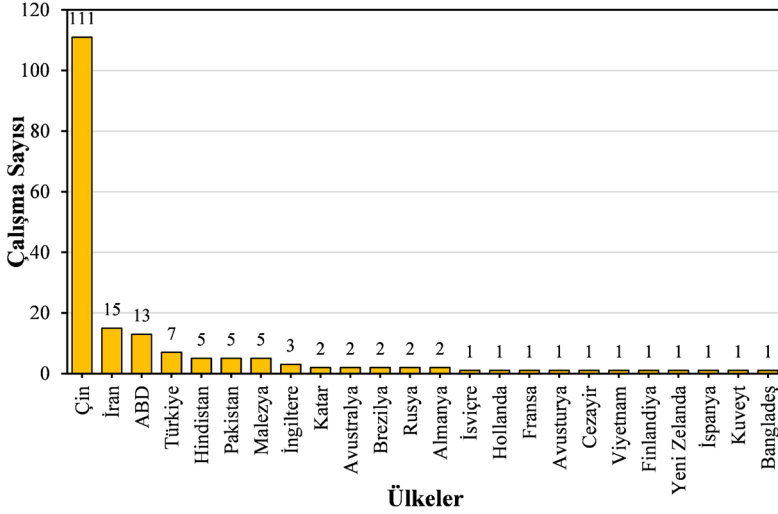
## 3. BULGULAR VE TARTIŞMA

### 3. 1. Genel Bakış

Asfalt kaplamalarda bağlayıcı olarak kullanılan bitümün çeşitli katkı maddeleri ile modifiye edilerek bitümün performansının ve dolayısıyla asfalt kaplamanın performansının artırılması uzun yıllardan beri kullanılan bir yöntemdir. Özellikle, artan trafik hacmi ve trafik yükleri, iklim koşulları gibi birçok etken asfalt kaplamaların performansının artırılması yönünde bir ihtiyaç meydana getirmiştir. Gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerde modifiyeli bitüm kullanımı oldukça yaygın hale gelmiş olup standart ve şartnamelerde yer almıştır. Ülkemizde de karayolları teknik şartnamesinde özellikle polimer modifiyeli bitümler için dikkate alınması gereken hususlar yer almaktadır [28].

Bu çalışmada yer alan makaleler incelenirken, birçok farklı ülkede bitüm modifikasyonu üzerine çalışma yapıldığı dikkat çekmiştir. Dolayısıyla, genel bir bakış sağlamak açısından ülkelere göre çalışmaların nasıl dağıldığının belirlenmesinin

faydalı olacağı düşünülmüştür. Bu doğrultuda, ülkelere göre çalışma sayıları Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. Ünelere göre makale havuzundaki çalışma sayısının dağılımı.

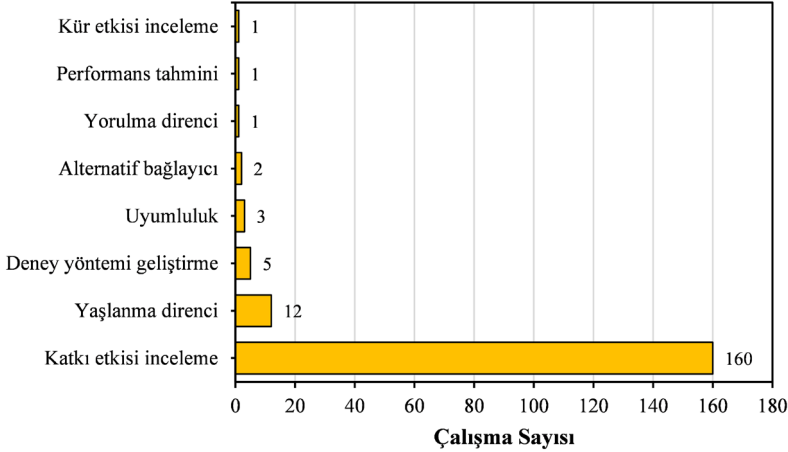
Şekil 2 incelendiğinde, Çin'de yapılan çalışmaların makale havuzundaki çalışmaların büyük bir çoğunluğunu kapsadığı görülmektedir. Bunun öncelikli sebebinin Çin'deki araştırmacı sayısının diğer ülkelere kıyasla oldukça fazla olması düşünülebilir. Buna ilaveten, Çin devletinin bilimsel araştırmalara verdiği destek de çalışmacıları motive etmekte ve sadece bu alan için değil birçok alan için bilim camiasında öncü konuma gelmesini sağlamaktadır. Öte yandan, İran [29-43], Türkiye [44-50], Hindistan [51-55], Pakistan [56-60] ve Malezya [61-65] gibi gelişmekte olan ülkelerin de bitüm modifikasyonu üzerine son dönemde önemli sayıda çalışmalar yürüttüğü görülmektedir. Gelişmekte olan ülkelerdeki çalışma sayılarının fazla olmasının sebebi de bu ülkelerde yol inşaatına verilen önemin bir göstergesi olarak düşünülebilir. Özellikle, ülkemiz karayolu inşaatı tekniğinde uzun yıllardan beri önemli bir uzmanlığa sahip olmuştur. Dolayısıyla, ülkemizdeki araştırmacılar arasında da bu durumun yansımaları görmek mümkündür.

ABD'de yapılan çalışmalar [66-78] makale havuzunda üçüncü sırayı almaktadır. Bunun sebebinin, Çin'in durumuyla benzer olduğu düşünülebilir. Ayrıca, AASHTO ve ASTM gibi bitüm performansının incelenmesinde kullanılan deneysel yöntemlerin standartlaştırılmasını sağlayan kurumlar da ABD'de bulunmaktadır. Dolayısıyla, bu kurumlarda yürütülen projeler de çalışma sayısının artmasına neden olmaktadır.



### 3.2. Çalışmaların Amaçlarına Göre Sınıflandırılması

Makale havuzundaki çalışmaların hepsi belirli hedefler ve amaçlar doğrultusunda yürütülen çalışmalardır. Bazı çalışmaların amaçlarının sadece bitüm modifikasyonun etkisini incelemekten farklı olduğu anlaşılmış dolayısıyla makalelerin amaçlarına göre de bir sınıflandırma yapılabileceği düşünülmüştür. Genel olarak makale amaçları için belirli gruplar oluşturulmuş olup bu gruplar: “Katkı etkisi inceleme”, “Yaşlanma direnci”, “Deney yöntemi geliştirme”, “Uyumluluk”, “Alternatif bağlayıcı”, “Yorulma direnci”, “Performans tahmini” ve “Kür etkisi inceleme” şeklinde isimlendirilmiştir. Çalışma amacına göre çalışma sayılarının dağılımını ifade eden bir grafik hazırlanmış olup Şekil 3’te verilmiştir. Şekil 3 incelendiğinde, çalışmaların büyük çoğunun bir katkı maddesinin bağlayıcının herhangi bir performansı üzerindeki etkisini incelemek üzere yürütüldüğü görülmektedir. Bunun en önemli sebebi, bu çalışmada belirlenen genel sınırlandırmalardır.



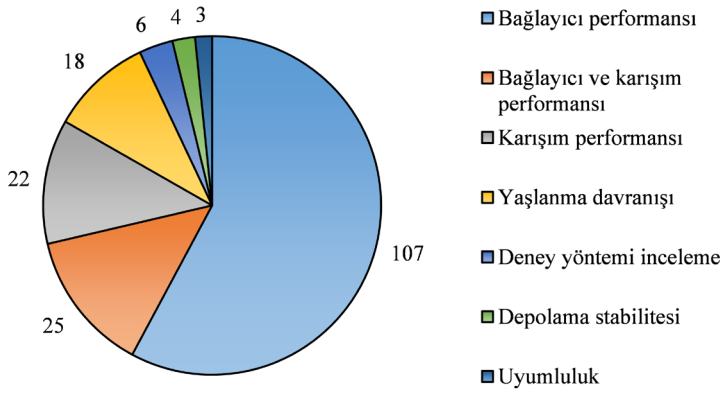
Şekil 3. Çalışma amaçlarına göre çalışma sayısının dağılımı.

Şekil 3’teki yaşlanma direnci ile ilgili çalışmalar [79-90], genellikle oksidasyon veya ultraviyole ışınlar sebebiyle bitümün yaşlanmasının sebeplerini ve bu yaşlanma mekanizmasını açıklamaya çalışan çalışmalardır. Buna ilaveten bazı makalelerde mevcut deney yöntemlerinin geliştirilmesi veya yeni deney yöntemlerinin üretilmesi üzerinde çalışılmıştır [78, 91-94]. Ayrıca, bitüm modifikasyonunda önemli bir nokta olan bitüm ile katkı malzemesi arasındaki uyumluluk (*compatibility*) ile ilgili yapılan çalışmalar da mevcuttur [95, 96]. İlgili çeken diğer bir araştırma konusu da asfalt kaplamalarda bitüm yerine %40-60 oranlarda başka bir madde kullanılarak alternatif bir bağlayıcı üretilmesidir [97, 98].

Yukarıda belirtilen amaçlarda yazılan makalelere ilaveten daha az çalışılan yolculma direnci [99], performans tahmini [66] ve kür etkisi inceleme [100] gibi konular üzerine yazılmış makaleler de bulunmaktadır.

### 3.3. Çalışmaların İncelenen Özelliklere Göre Sınıflandırılması

Makale havuzundaki çalışmalar incelenirken çalışmaların belirli özellikler üzerinde belirli metodolojiler üzerinde yürütüldüğü anlaşılmıştır. Dolayısıyla, çalışmada sadece bağlayıcının mı incelendiği ya da sadece asfalt karışımın mı incelendiği yoksa bu iki farklı metodun birlikte mi kullanıldığına dair bir analiz yapılmıştır. Yapılan inceleme sonucunda makalelerde incelenen özelliklerin çalışma sayılarına göre dağılımı belirlenmiş olup Şekil 4'te verilmiştir.

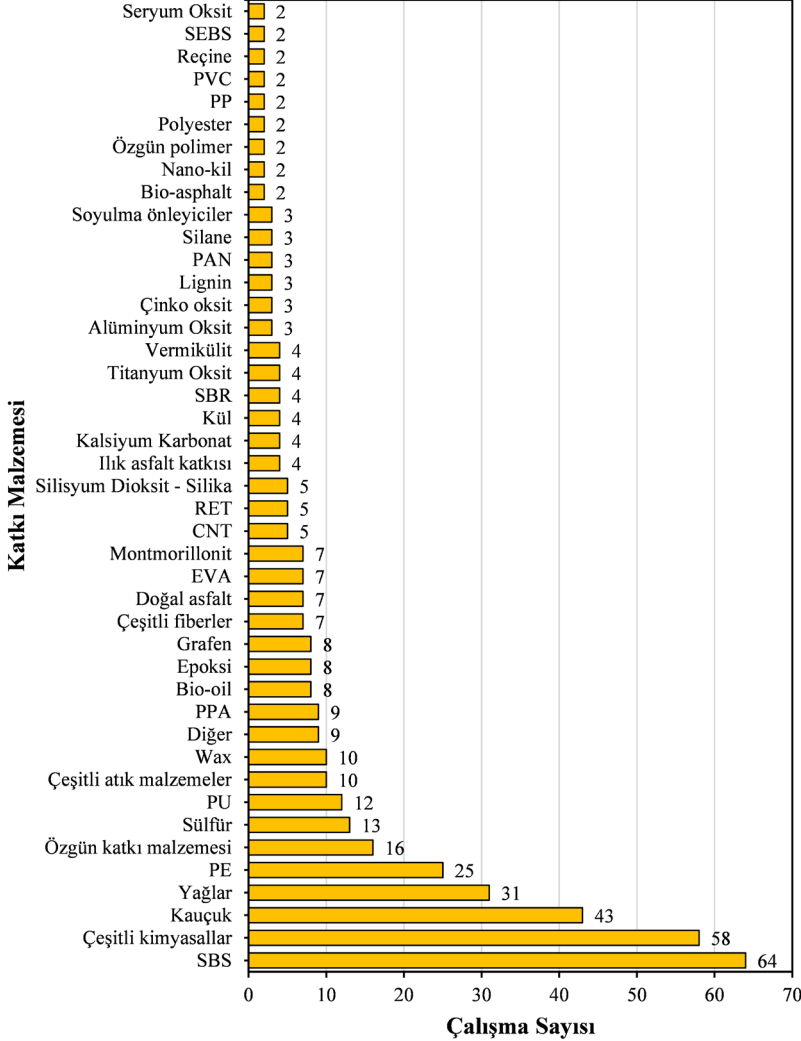


Şekil 4. İncelenen özelliklere göre çalışma sayısının dağılımı.

Şekil 4 incelendiğinde, çalışmaların çoğunda temel olarak bağlayıcı performansının incelendiği görülmektedir. Bitüm modifikasyonu kavramı doğrudan bağlayıcıya bir katkı malzemesinin ilave edilmesi anlamına geldiğinden, çalışmaların çoğunluğunda bağlayıcı performansını incelenmesi oldukça beklenen bir durumdur. Buna ilaveten, bitüm modifikasyonunun ana amacının asfalt kaplama performansını arttırmak olması düşünüldüğünde hem bağlayıcı hem de karışım performansının incelendiği çalışmalar [39-42, 50, 55, 59, 60, 66, 70, 76, 77, 101-113] da büyük bir öneme sahiptir ve oldukça fazla sayıdadır. Yine bu durum dikkate alınarak, bazı çalışmalarda [30-32, 34, 35, 37, 52, 53, 56, 57, 73, 75, 114-123] her ne kadar bitüm modifikasyonu kullanılsa da performans incelemesi sadece karışım performansı üzerinden yapılmıştır.

### 3.4. Bitüm Modifikasyonunda Kullanılan Katkı Maddeleri ve Kullanım Sıklıkları

Makalelerde kullanılan katkı maddeleri listelenmiş ve makale havuzundaki çalışmaların kaçında hangi katkı maddesinin kullanıldığı analiz edilmiştir. Bu analiz yapılırken öncelikle katkı maddeleri makalenin içerisindeki adıyla not edilmiş ardından genel bir gruplama yapılarak katkı maddeleri sınıflandırılmıştır. Katkı malzemelerinin çalışma sayılarına göre dağılımı Şekil 5'te verilmiştir.



Şekil 5. Katkı maddelerinin çalışma sayısına göre dağılımı.

Şekil 5 incelendiğinde, SBS katkı malzemesinin mevcut makale havuzunda en sık kullanılan katkı maddesi olduğu görülmektedir. SBS katkı malzemesi bitüm modifikasyonunda yararlılığı kanıtlanmış bir katkı malzemesi olup dünya genelinde yaygın olarak kullanılmaktadır. SBS modifikasyonunun saf bitümün tekerlek izine, yorulmaya ve yaşlanmaya karşı direncini arttırdığı bilinen bir olgudur. Bitüm modifikasyonu piyasasında kendi kanıtlamış bir katkı malzemesi olmasından dolayı bilimsel çalışmalarda; bazen doğrudan piyasadaki temin edilen SBS modifiyeli bitüm kullanılmakta, bazen de bir katkı maddesinin performans üzerindeki faydası SBS modifiyeli bitümün faydası ile kıyaslanması şeklinde kullanılmaktadır. Bu durumlar göz önüne alındığında, SBS katkı malzemesinin bu kadar sıklıkla halen kullanılıyor ve makale havuzundaki çalışmalarda yaygın kullanılan katkı malzemesi olması beklenen bir durumdur.

Makale havuzunda en yaygın kullanılan ikinci katkı malzemesi olarak çalışma esnasında oluşturulan “çeşitli kimyasallar” grubu görülmektedir. Bu grup içerisinde katkı maddelerini işlevselleştirmek, yüzey aktif veya reaktif hale getirmek gibi çeşitli kimyasal proseslerde kullanılan veya direk katkı malzemesi niteliğindeki kimyasallar yer almaktadır. Çok sayıda farklı kimyasalın bitüm modifikasyonu içerisine dahil edilmesi sebebiyle bu grup analiz sonucunda en yaygın ikinci grup olarak ortaya çıkmıştır. Çeşitli kimyasallar grubu altındaki katkı maddelerine çalışmanın ilerleyen bölümlerinde değinilecektir.

Bitüm modifikasyonunda en çok kullanılan üçüncü katkı maddesi olarak ka-  
uçuk (*rubber*) görülmektedir. Atık araç lastiklerinin öğütülmesi gibi çeşitli yollarla temine edilebilen ve genellikle atık niteliğinde olan bu katkı malzemesi birçok araştırmacının dikkatini uzun yıllardan beri çekmektedir. Sürdürülebilir asfalt kaplama inşaatı için önemli bir malzeme niteliğindeki kauçuklar bitüm modifikasyonunda kullanılabilir olduğunda asfalt kaplamaların tekerlek izine karşı direncini arttırmaktadırlar.

En yaygın kullanılan dördüncü katkı maddesi olarak görülen yağların bitüm modifikasyonunda kullanımı son dönemlerde yaygınlaşmaya başlamıştır. Özellikle bu çalışmanın kapsamı dışında tutulan geri dönüştürülmüş asfaltlar ve gençleştirme makaleleri de dikkate alınırca yağların yaygınlık açısından daha üst sıralarda da yer alabileceği düşünülmektedir. Mevcut konumunda da oldukça yaygın kullanıldığı söylenebilecek olan yağların çeşitli avantajları mevcuttur. Yağlar bitümü yumuşatarak asfalt kaplamaların karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarını düşürebilmekte, ayrıca bitümün yaşlanmaya ve düşük sıcaklık çatlamlarına karşı direncini de arttırmaktadır. Bu avantajlarına, bir de atık malzeme niteliği taşıması ile sürdürülebilir asfalt kaplama inşaatına olan katkısı eklenince yaygın kullanılan bir katkı maddesi olması kaçınılmazdır. Bu çalışmada yağlar genel bir grup olarak değerlendirilmiş olup bu grup içerisindeki yağ çeşitleri ile ilgili detaylı bilgiler çalışmanın ilerleyen bölümlerinde verilmiştir.

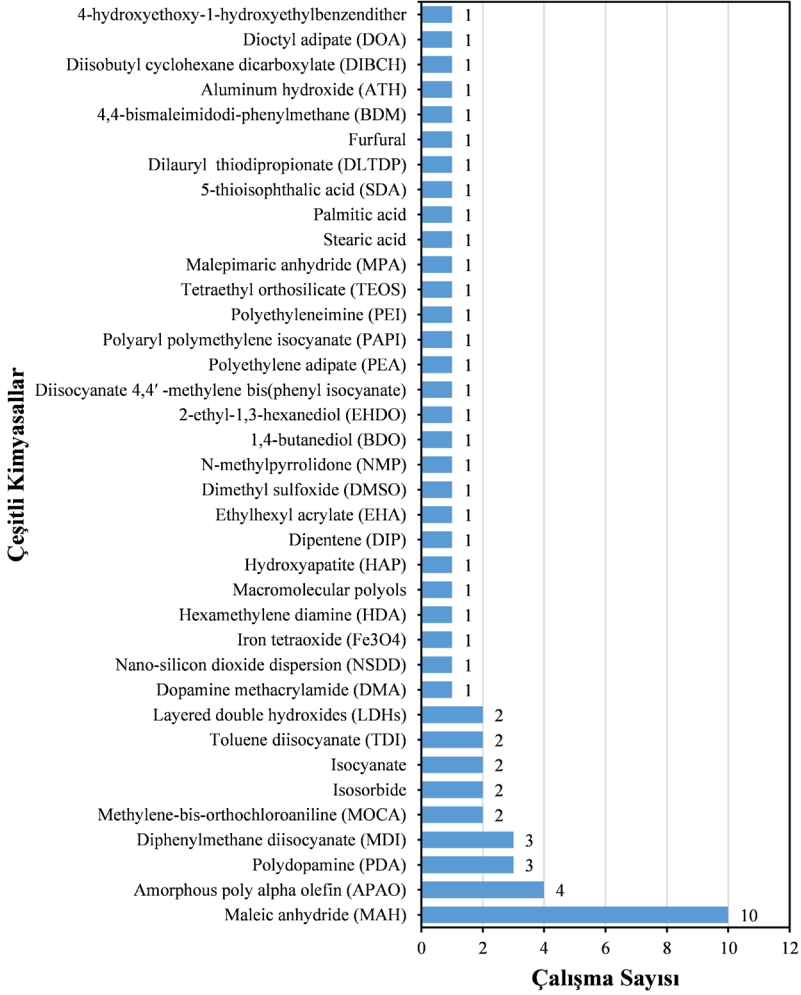
Çalışmalarda kullanım sıklığına göre beşinci sırayı alan katkı malzemesi grubu ise polietilenlerdir (PE). PE'ler çalışmalarda farklı biçimlerde kullanıldığı için en genel adıyla PE olarak gruplandırılmıştır. Genel olarak PE'ler plastik atıklarından elde edilmektedir. Dünya gündeminde plastik atıklarının geri dönüştürülmesi önemli bir alan kapladığından, atık plastiklerin değerlendirilmesi üzerinde bitüm modifikasyonu umut vadeci bir uygulama sahası olmuştur. Dolayısıyla, PE ile bitüm modifikasyonu üzerinde yapılan çalışmaların da sayısı oldukça fazladır. Çalışmanın ilerleyen bölümlerinde PE grubundaki katkı malzemeleri ile ilgili detaylı bilgi verilecektir.

Son olarak Şekil 5'te üstünde durulması gereken bir diğer husus da "özgün katkı malzemesi" olarak adlandırılan gruptur. Bu grupta, daha önce bitüm modifikasyonunda kullanılmamış, kimyasal olarak yeni sentezlenmiş katkı maddeleri bulunmaktadır. Bu gruptaki katkı maddeleri ile ilgili olarak da ilerleyen bölümlerde bilgi verilecektir.

### 3.4.1. Çeşitli Kimyasallar

Bir önceki bölümde açıklanan çeşitli kimyasallar grubunun içerisindeki katkı maddeleri ve çalışmalardaki kullanım sıklıklarına göre dağılımı Şekil 6'da verilmiştir.

Bu şekil incelendiğinde makale havuzunda yer alan çalışmalarda en fazla *Maleic Anhydride* (MAH) katkı maddesine yer verildiği görülmektedir [43, 50, 100, 124-130]. Bazı polimer ile bitüm arasındaki polarite farkından dolayı uyumluluk düşük olmaktadır. Bu durumun çözümü için MAH kullanımı oldukça yaygınlaşmaktadır. Bazı çalışmalarda MAH doğrudan bitüme ilave ederek polimer ile bitüm arasındaki uyumluluğunun artırılması çalışılırken [100, 124, 125, 128, 130], bazı çalışmalarda ise polimer MAH ile önceden aşılama yöntemi kullanılarak işlevselleştirilmektedir [43, 50, 126, 127, 129].



Şekil 6. Çeşitli kimyasallar ve çalışmalarda kullanım sıklıkları.

Makale havuzunda sıklıkla kullanılan çeşitli kimyasallar grubundaki bir diğer katkı maddesi *Amorphous Poly Alpha Olefin* (APAO)'dir [38, 115, 122, 131]. Bitüm için doğrudan katkı malzemesi olarak kullanılan APAO, bitümün depolama stabilitesini ve tekerlek izi direncini arttıran bir malzemedir.

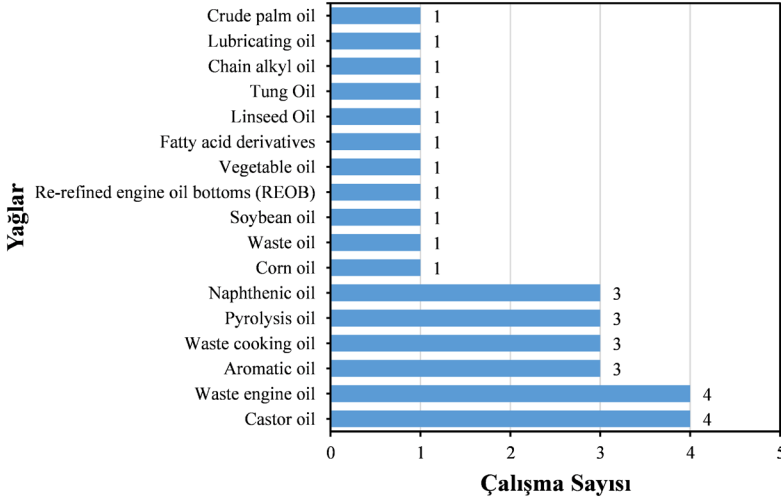
Bu gruptaki diğer bir katkı malzemesi olan *Polydopamine* (PDA) genellikle nano malzemelerin [132, 133] veya fiberlerin [134] (yüzeylerinin kaplanarak bu

malzemelerin bitüm modifikasyonu esnasında kendi aralarında topaklanmalarını engellemek amacıyla kullanılmıştır. Bu kısımda incelenecek son katkı maddesi olarak, *Diphenylmethane diisocyanate* (MDI) kimyasalı, bir çeşit isocyanate olmakla birlikte özellikle Poliüretan (PU) ile bitümün modifiye edildiği çalışmalarda, PU'nun hazırlanmasında kullanılan bir çeşit kimyasaldır [125, 130, 131].

Yukarıda bahsedilenlere benzer şekilde grafikte isimleri verilen çeşitli kimyasal katkı maddeleri kimi zaman doğrudan bitüm modifikasyonuna katılarak, kimi zaman başka bir katkı maddesini kaplayarak veya işlevselleştirerek ya da başka bir katkı maddesinin hazırlanması esnasında kullanılarak makalelerde yer almışlardır [81, 96, 98, 100, 101, 117, 124, 125, 128, 130-145].

### 3.4.2. Yağlar

Makale havuzundaki en çok kullanılan dördüncü grup konumunda yağlar grubu içerisinde birden çok çeşit yağı barındırdığı için ayrıca grup içerisindeki katkı malzemelerinin çalışma sayısına göre dağılımı analiz edilmiştir. Bunun sonucunda Şekil 7'de farklı yağların çalışmalardaki kullanım sıklıklarına göre dağılımları verilmiştir.



Şekil 7. Yağ türlerine göre çalışma sayılarının dağılımı.

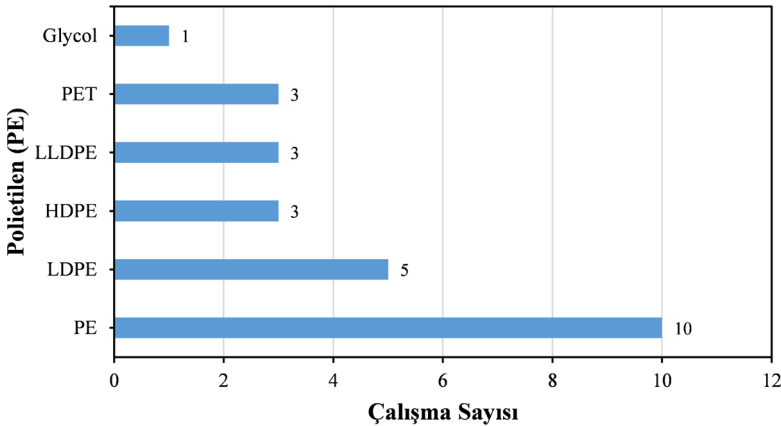
Bitüm modifikasyonunda, sürdürülebilirlik ve çevresel katkı açısından genelde atık yağlar tercih edilmektedir. Atık yağları iki guruba ayırmak mümkündür: biyo esaslı yağlar (bitkisel yağlar, hayvansal yağlar, kızartma yağları vb.) ve petrol esaslı yağlar (*lubricating* yağı, motor yağı, silindir yağı ve bunların atıkları vb.) [146].

Güncel çalışmalar dikkate alındığında, bir tür bitkisel yağ olan *Castor* (kunduz) yağının [79, 98, 113, 146], sanayi gibi bölgelerde oldukça kolay erişilebilen atık motor yağının [36, 58, 87, 88], ticari bir ürün olan ve genellikle uyumlaştırıcı olarak kullanılan aromatik yağın [146-148], erişimi en kolay olan ve ciddi miktarda dünyada bulunan atık kızartma yağlarının [49, 71, 116] çalışmalarda sıklıkla kullanıldığı görülmektedir. Yağlar genellikle bitümü yumuşatarak tekerlek izine karşı direncini düşürürken, düşük sıcaklık çatlaklarına, yorulmaya ve yaşlanmaya karşı direncini arttırmaktadır.

Makale havuzunda, doğrudan katkı maddesi olarak kullanılan veya başka bir katkı maddesinin uyumlaştırıcısı olarak kullanılan biyo esaslı veya petrol esaslı; piroliz yağı [63, 65, 107], *Napthenic oil* [126, 146, 149], mısır yağı [69], atık yağ [150], soya yağı (A200), rafine edilmiş motor yağı kalıntısı [151], bitkisel yağ [74], *fatty acid derivatives* [74], çin yağı [146], keten tohumu yağı [146], *chain alkyl oil* [146], *lubricating* yağı [152], palmye yağı [65] gibi yağları içeren çalışmalar mevcuttur.

### 3.4.3. Polietilen (PE)

Makale havuzunda sıklıkla kullanılan katkı malzemeleri arasında PE ve türevleri de yer almaktadır. PE adı altında bir grup altında toparlanan bu makalelerde; *High density polyethylene* (HDPE), *low density polyethylene* (LDPE), *linear-low density polyethylene* (LLDPE), *polyethylene terephthalate* (PET), *polyethylene glycol* (PEG) gibi farklı katkı maddeleri bulunmaktadır. PE alt gruplarının ve direk PE olarak adlandırılan katkı maddelerinin çalışma sayılarına göre dağılımları Şekil 8'de verilmiştir.



Şekil 8. PE'ler ve çalışma sayısına göre dağılımları.



Şekil 8 incelendiğinde, PE'nin kullanıldığı çalışmaların çoğunluğunda özel bir gruba dahil edilmeden en bir isimlendirmenin tercih edildiği görülmektedir [43, 66, 95, 102, 123, 153-156]. Bununla birlikte LDPE'nin kullanıldığı 5 [91, 109, 157-159], LLDPE, HDPE ve PET'in kullanıldığı 3'er [39, 43, 71, 72, 157, 158, 160, 161] ve PEG'nin kullanıldığı 1 [161] çalışma bulunmaktadır.

PE bitüme ilave edildiğinde genellikle tekerlek izine karşı dirençte artış gözlemlenirken düşük sıcaklık performansında ise azalma gözlemlenmektedir. Buna ilaveten PE'nin bitüm ile olan uyum problemi onun bitüm ile karıştırılabilirliğini zorlaştırmakta ve uygulanabilirliğini düşürmektedir. Bu problemlerin üstesinden gelmek için araştırmacılar PET'in yağ ile işlenmesi [71] ve PE'nin epoksi ile işlevselleştirilmesi [153] gibi çeşitli metotlar denemişlerdir. Bu sayede, bitüm ile PET'in uyumu artırılarak elde edilen performans geliştirilmiştir.

Atık plastiklerden elde edilen PE'lerin bitüm ile olan uyumluluğunun artırılması önemli bir çalışma alanı olarak gözükmektedir. Bu alanda elde edilecek başarılı sonuçlar doğrudan dünya ve çevre katkı sağlayabilecek araştırmalar olarak değerlendirilebilir.

#### 3.4.4. Diğer Özgün Katkı Maddeleri

Makale havuzundaki çalışmaların bir kısmında literatürde daha önce kullanılmamış ilgili makalede hazırlanan veya sentezlenen katkı maddeleri bulunmaktadır. Bu çalışmalardaki katkı maddeleri "Özgün katkı malzemesi" olarak gruplandırılıp Şekil 5'te verilen analiz sonuçlarına ilave edilmiştir. Bu katkı malzemeleri ile ilgili olarak Tablo 1 hazırlanmış ve bu katkı maddelerinin isimleri sağladığı faydalar bu tablo içerisinde verilmiştir.

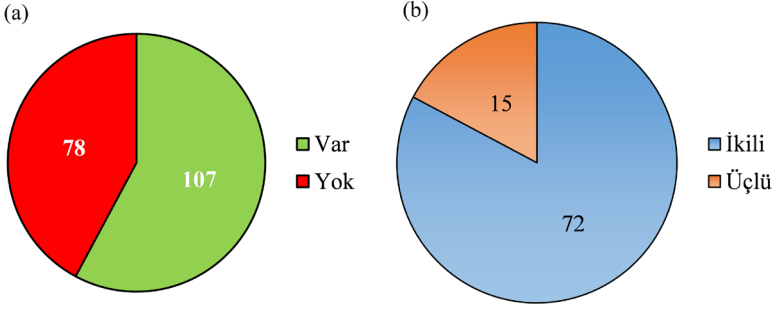
### 3.5. Kompozit Modifikasyon

Kompozit modifikasyon kavramı bitüme birden fazla katkı maddesinin aynı anda veya sırayla ilave edilmesi olarak düşünülebilir. Zaman içerisinde çok fazla katkı maddesinin bitüme ilave edilerek elde edilen sonuçların yayınlanması sebebiyle, bitüme katılacak katkı maddesi bulmak araştırmacılar için zorlaşmıştır. Bu sebeple, özgün çalışmalar üretilebilmek adına bitüm modifikasyonu alanında kompozit modifikasyon kavramı ortaya çıkmış ve daha önce bitüme birbirlerinden ayrı olarak ilave edilen katkı maddeleri birlikte ilave edilerek yeni bir çalışma olarak sunulmuştur. Bu durumun getirdiği en büyük avantaj, bitümün farklı özelliklerini geliştiren katkı maddelerinin birlikte kullanarak ortak bir etki yaratmalarını sağlamaktır. Örneğin, polimer ilavesinde yüksek sıcaklık performansı artarken karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları da olumsuz yönde artmaktadır. Bunun üstesinden gelmek için araştırmacılar polimer katkısına ılık asfalt katkısı ilave ederek bu

dezavantajı ortadan kaldırmışlardır [55, 162]. Başka bir örnek olarak, bitümün yüksek sıcaklık performansını arttırıp düşük sıcaklık performansını etkilemeyen bir katkı maddesi ile birlikte bitümün düşük sıcaklık performansını arttıracak bir katkı maddesinin kullanılması ve sonuç olarak saf bitümün hem yüksek sıcaklık performansının hem de düşük sıcaklık performansının artmasını sağlamaktadır [49].

**Tablo 1.** Özgün katkı malzemesi olarak değerlendirilen gruptaki çalışmalar.

Makale Yazarları	Katkı Malzemesi Adı	Katkı Malzemesinin Bitüme Sağladığı Fayda
Yeşilçiçek vd. [44]	Çam Sakızı Esaslı Bor Katkısı	Yüksek sıcaklık ve yorulma performansında artış.
Sheng vd. [163]	Silane Modifiyeli Yanma Geciktirici Katkı Maddesi (FRB-SC)	Tünellerde yangın geciktirme amaçlı olarak kullanılabilir. Şekil değiştirmeye karşı dirençte artış.
Oruç vd. [46]	<i>Cyclic Borate Ester</i> (CBE)	Yüksek uyumluluk. Tekerlek izine karşı dirençte ve elastikiyette artış.
Wang vd. [83]	Vulkanize <i>Eucommia Ulmoides</i> Sakızı	Yaşlanma direncine karşı artış.
Kök vd. [47]	Atık <i>Photopolymer</i> (PhP)	Tekerlek izine ve yorulmaya karşı dirençte artış.
Xu vd. [126]	<i>SBSC Modifier</i>	Yüksek sıcaklık performansında artış. Yüksek depolama stabilitesi.
Zha vd. [164]	<i>Neodymium Iron Boron Magnetic Powder</i>	Yüksek sıcaklık performansında ve bağlayıcılık kapasitesinde artış.
Xia vd. [129]	<i>Maleic Anhydride Grafted</i> Atık Deri (MAH-WL)	Yüksek uyumluluk.
Zhao vd. [165]	<i>Carbon Quantum Dots</i> (CQDs)	Tekerlek izine karşı dirençte artış. SBS ile uyumluluk.
Li vd. [141]	<i>Cereclor Plasticizer</i>	Yüksek sıcaklık performansında artış.
Meng vd. [108]	<i>Geopolymer</i>	Yüksek sıcaklık performansında artış. Yüksek depolama stabilitesi.
Saadeh vd. [75]	<i>Biochar</i>	Tekerlek izine karşı dirençte artış.
Ziari vd. [40]	<i>Amorphous Carbon Powder</i> (ACP)	Yüksek sıcaklık performansında artış.
Han vd. [166]	<i>P-gel</i>	Yüksek sıcaklık performansında artış.

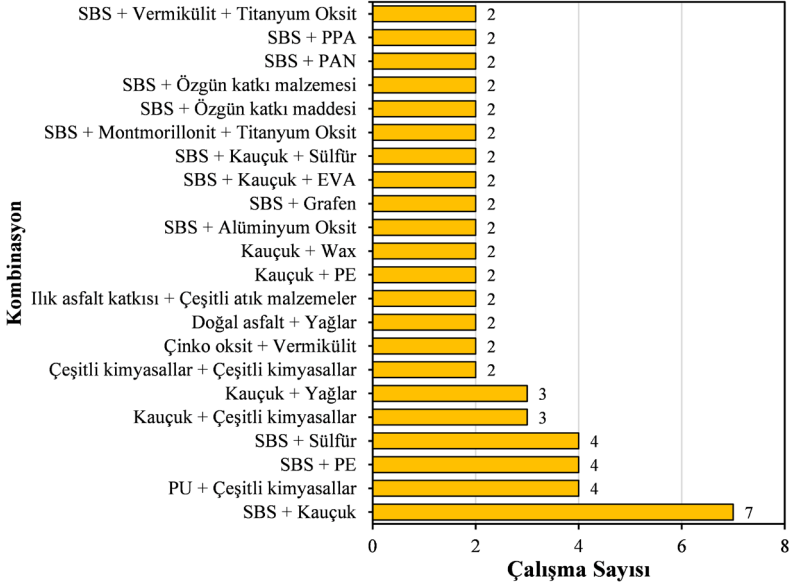


**Şekil 9.** Kompozit modifikasyon: (a) makalede kompozit modifikasyon olup olmadığı ile ilgili inceleme, (b) kompozit modifikasyonda kullanılan katkı malzemesi sayısı ile ilgili inceleme.

Kompozit modifikasyonun yukarıda ifade edilen faydaları göz önüne alındığında, bu çalışmadaki makale havuzunda içerisinde kompozit modifikasyon barındıran çalışmaların sayısının oldukça fazla olması beklendik bir durumdur. Bu sebeple, makale havuzunda kompozit modifikasyonu ile ilgili olarak bir analiz yapılmış ve elde edilen sonuçlar Şekil 9, 10 ve 11’de verilmiştir. Şekil 9 (a)’da makale havuzunda kaç adet makalede kompozit modifikasyona yer verildiği belirtilmiştir. Buradan, makale havuzundaki 185 adet makalenin 107’si gibi büyük bir çoğunluğunda kompozit modifikasyona yer verildiği anlaşılmaktadır. Kompozit modifikasyonun getirdiği faydalar göz önüne alındığında bu durum beklendik bir sonuçtur. Şekil 9 (a)’da ifade edilen bu bilgiye ek olarak, kompozit modifikasyonda kullanılan katkı maddeleri sayısı hakkında da bilgi verilmiştir (Şekil 9 (b)). Bu bilgiye bakılarak, ikiden fazla katkı maddesinin bitüme ilave edildiği çalışmaların da günümüzde yaygınlaşmaya başladığı görülmekte olup gelecek dönemlerde benzer çalışmaların sayısında artış olabileceği tahmin edilebilir.

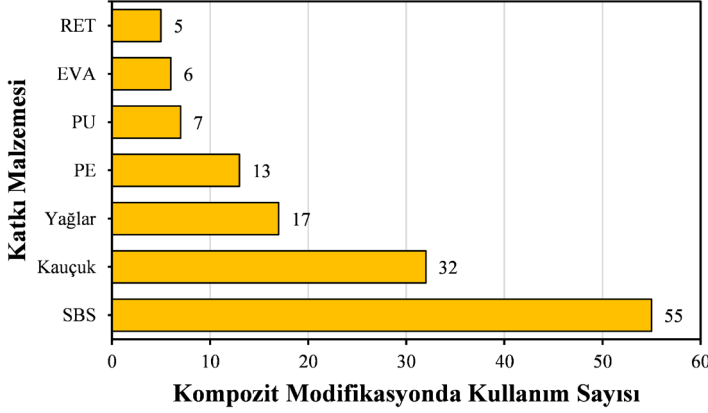
Kompozit modifikasyonla ilgili olarak bir diğer analiz ise hangi katkı maddelerinin birlikte kullanıldığını incelemek üzere yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 10’da verilmiş olup bu şekil incelendiğinde, SBS+Kauçuk ikilisini bitüm modifikasyonunda birlikte sıklıkla kullanıldığı görülmektedir [64, 105, 114, 149, 158, 167, 168]. Ayrıca, SBS+Kauçuk kombinasyonuna başka bir katkı malzemesinin de ilave edildiği çalışmalar da mevcuttur [132, 169]. Bu iki katkı maddesinin birlikte kullanılması, bitümün yüksek sıcaklık performansında önemli bir artış sağlamaktadır. Şekil 10’da sıklıkla kullanılan katkı kombinasyonları arasında PU+Çeşitli kimyasallar [100, 125, 131, 137], SBS+PE [43, 95, 158], SBS+Sülfür [64, 84, 90, 170] katkı kombinasyonları bulunmaktadır. PU ile çeşitli kimyasallar PU’nun sentezlenmesi sırasında uyumlaştırıcı olarak kimyasalların kullanılmasından kaynaklanmaktadır. Buna ilaveten, SBS ile sülfürün sıklıkla birlikte kullanılmasının en önemli

sebebi düşük depolama stabilitesine sahip SBS modifiyeli bitümlere sülfür ilave edildiğinde bu problemin ortadan kalmasıdır.



**Şekil 10.** Kompozit modifikasyonda kullanılan katkı malzemesi kombinasyonları ve çalışma sayısına göre dağılımları.

Kompozit modifikasyon ile ilgili son analiz ise kompozit modifikasyonlarda hangi katkı malzemesinin ne kadar sıklıkla kullanıldığını belirlemek adına yürütülmüştür. Bu doğrultuda yapılan analizden elde edilen sonuçlar Şekil 11'de verilmiştir. Bu şekil incelendiğinde, kompozit modifikasyonda en sık SBS modifiyeli bitümün kullanıldığı görülmektedir. Bunun sebebi olarak daha önce de ifade edildiği üzere SBS'in hali hazırda kendini hem akademik literatürde hem de uygulama sahasında kendini kanıtlamış bir katkı maddesi olmasıdır. Öte yandan, makale havuzundaki 32 çalışmanın kompozit modifikasyon kombinasyonunda kauçuk katkı malzemesinin dahil edildiği tespit edilmiştir. Kauçuk katkı maddesinin bir atık maddesi olması ve bitüm ile etkileşimi sağlandığında bitüm performansında önemli gelişmeler elde edilebildiği düşünüldüğünde bu durum da olağandır. Ayrıca, kompozit modifikasyon kombinasyonunda sıklıkla kullanılan üçüncü katkı maddesi olarak yağlar görülmektedir. Bunun sebebi olarak, hem yağların bir atık türü olması hem de bitümü yumuşatarak düşük sıcaklık performansında ve işlenebilirlikte sağladıkları katkı gösterilebilir.



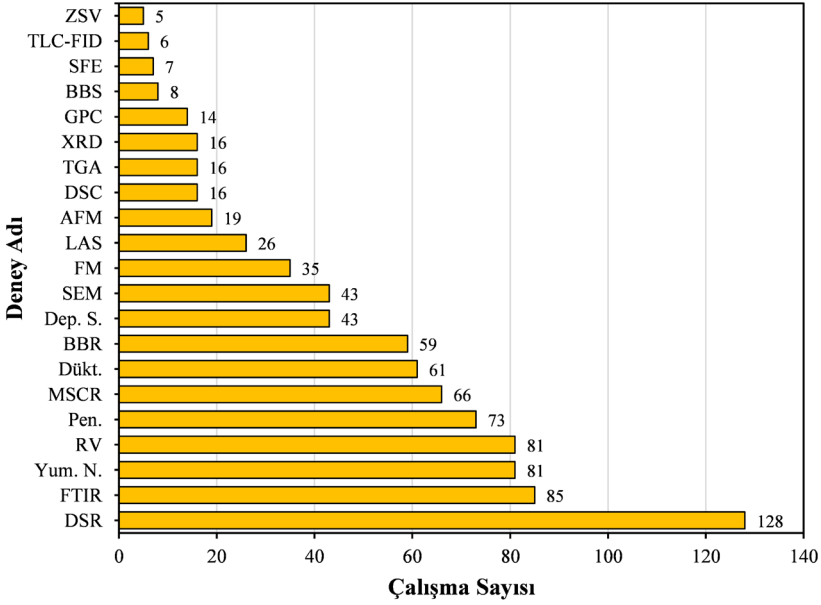
Şekil 11. Katkı malzemelerinin kompozit modifikasyonda kullanım sıklıkları.

### 3.6. Kullanılan Deneysel Yöntemler

Bu çalışmanın son kısmında, makale havuzundaki çalışmalarda yer alan deneysel yöntemlerden bağlayıcı ile ilgili olanları analiz edilmiştir. Her çalışmada kullanılan deneysel yöntem seti tabloya işlenerek analiz yürütülmüş ve elde edilen sonuçlar Şekil 12’de verilmiştir. Bu şekil incelendiğinde, 128 makalede DSR (Dinamik Kesme Reometresi, *Dynamic Shear Rheometer*) deneyine yer verildiği görülmektedir. Bitümlerin performanslarının belirlenmesinde 2000’li yılların başında ortaya çıkan Superpave sisteminin bir getirisi olan tekerlek izi direnci ( $G^*/\sin\delta$ ) ve yolulma direnci ( $G^*\sin\delta$ ) parametrelerinin DSR cihazı ile belirlenebiliyor olması bu deneyin bu kadar yaygınlaşmasının birinci sebebi olarak düşünülebilir. Öte yandan, DSR cihazı ile frekans ve sıcaklık taramaları yapılarak bağlayıcıların reolojik özellikleri hakkında hassas ve güvenilir bilgilerin edinilmesi de mümkündür. İlgili deneyin (ya da deney cihazının) barındırdığı faydalar göz önüne alındığında, Şekil 12’de belirtildiği üzere makale havuzundaki çalışmalarda en yaygın kullanılan çalışma olması oldukça beklendik bir durumdur.

DSR deneyinden farklı olarak, bitüme uygulanan geleneksel deneyler adı altında penetrasyon, yumuşama noktası ve düktilite deneyleri bitüm ile ilgili çalışmaların başlamasından beri kullanılan deneylerdir. Dolayısıyla bilim dünyasında kabul görmüş, nispeten daha az maliyetli ve yürütülmesi kolay olan bu deneylerin halen kullanılması da oldukça beklendik bir durumdur. Öyle ki, makale havuzundaki çalışmaların 81’inde yumuşama noktası, 73’ünde penetrasyon ve 61’inde düktilite deneylerine yer verilmiştir. Geleneksel deneylere ilave olarak, son dönemler yapılan bazı çalışmalarda artık geleneksel deneyler adı altında da verilmeye başlanan

RV (Dönel Viskozite, *Rotational Viscosity*) deneyi, bağlayıcının viskozitesinden yola çıkılarak asfalt kaplamaların işlenebilirliğini tahmin etmede kullanılan bir deney yöntemi olup çalışmaların büyük bir çoğunluğunda kullanılmıştır. Bunun sebebi olarak, karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarının hem ekonomik açıdan hem de çevresel hususlarla ilgili olarak büyük bir önem taşıması ve dolayısıyla yapılan çalışmalarda bu özelliğin incelenmesine ihtiyaç duyulması gösterilebilir.



**Şekil 12.** Makalelerde kullanılan deneysel metotlar ve çalışma sayılarına göre dağılımları.

Makale havuzundaki çalışmalarda en sık kullanılan ikinci deneysel yöntem FTIR (Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi, *Fourier Transform Infrared Spectroscopy*) analizidir. FTIR deneyinde amaç, test edilen numune tarafından belirli bir dalga boyu aralığında emilen kızılötesi ışık miktarını belirlemektir [171]. Bu bilgiden yola çıkarak bitüm ile ilgili çalışma yapan araştırmacılar; bitüm ile katkı maddesinin kimyasal bir etkileşim gösterip göstermediği, farklı yaşlara koşulları altında bağlayıcının iç yapısında nasıl bir değişim meydana geldiği, yaşlanmanın bitümün iç yapısındaki etkisinin şiddetinin belirlenmesi gibi hususlarda değerlendirmeler yapabilmektedirler. FTIR deneyinin, nispeten pratik bir deney olması ve bağlayıcılar için birden çok özellik hakkında fikir vermesi sebebiyle son dönemlerde bu denli yaygınlaşmış olması olağan bir durumdur.

Şekil 12 incelendiğinde dikkate değer bir diğer yöntemi MSCR (*Multiple Stress Creep Recovery*) deneyidir. Geçtiğimiz yıllarda Superpave performans sınıflandırılmasına dahil edilen bu deney yöntemi, DSR deneyindeki  $G^*/\sin\delta$  tekerlek izi parametresinin özellikle polimer modifiyeli bitümlerin sınıflandırılmasını doğru biçimde yapamamasından dolayı ortaya çıkmıştır. MSCR deneyinde, bağlayıcıların tekerlek izi hassasiyetinin değerlendirilmesinde  $J_{nr}$  (*non-recoverable creep compliance*) parametresi kullanılmaktadır. Bitüm modifikasyonu ile ilgili çalışmalarda MSCR deneyinin bu denli yaygınlaşmış olmasında deneyin Superpave sınıflandırılmasına dahil edilmesi önemli rol oynamakla birlikte, bu deneyin araştırmacıların güvenini de kazanmış olduğu söylenebilir.

BBR (Kiriş Eğme Reometresi, *Bending Beam Rheometer*) deneyi de çok kullanılan deneysel yöntemler arasında üst sıralarda yer almaktadır. Bu deney ile bağlayıcıların düşük sıcaklıklarının değerlendirilmektedir. Özellikle SuperPave performans sınıflandırılmasının bir parçası olan bu deneyin bu denli sık kullanılması da beklenen bir durumdur.

Depolama stabilitesi deneyi, modifiyeli bitümlerin yüksek sıcaklıklarda depolanması halinde saf bitüm ile katkı malzemesi arasında bir ayrışma meydana gelip gelmeyeceğini kontrol etmek için kullanılmaktadır. Başka bir ifadeyle, bitüm ile katkı malzemesinin uyumluluğunun incelendiği bu deney yöntemi nispeten pratik ve eski bir yöntem olmasına rağmen son dönemlerde yaygınlaşarak kullanılmaya devam etmektedir.

Şekil 12'deki deneysel yöntemler listesi incelendiğinde, FM (*Fluorescence Microscopy*), SEM (*Scanning Electron Microscopy*) ve AFM (*Atomic Force Microscopy*) gibi mikroskopik yöntemlerin bitüm modifikasyonu ile ilgili çalışmalarda sıklıkla kullanıldığı görülmektedir. FM deneyi ile, modifiyeli bitümde katkı maddesinin topaklanması ile ilgili bir problem olup olmadığı kontrol edilebilirken, SEM deneyi ile katkı maddelerinin yüzey morfolojisi, parçacık boyutu, şekli ve dağılımı gibi özellikleri incelenebilmektedir. Ayrıca, AFM deneyi ile, çeşitli malzemelerin yüzey topografisi çıkarılmakta ve pürüzlülükleri tespit edilebilmektedir.

Makale havuzundaki 26 çalışmada LAS (*Linear Amplitude Sweep*) testinden faydalandığı görülmektedir. DSR deney cihazından faydalanılarak yürütülen LAS testi, performans sınıflandırılmasındaki yorulma parametresi olan  $G^*/\sin\delta$  değerinin iyileştirilmesi adına ortaya atılmış bir deney yöntemidir. MSCR deneyi ile benzer şekilde literatüre giriş yapmış olmasına ve standartlaştırılmasına rağmen MSCR deneyinde olduğu kadar yaygın bir kullanım sıklığına sahip olmadığı görülmektedir. Bunu sebebi olarak bu deneyin henüz performans sınıflandırılmasında zorunlu hale getirilmemiş olması düşünülebilir.

Yukarıda ifade edilen performans esaslı deneylere ilave olarak, çeşitli kimyasal deney yöntemlerinin de bitüm ile kullanımının gün geçtikçe yaygınlaştığı görülmektedir. DSC (*Differential scanning calorimetry*), TGA (*Thermogravimetric Analysis*), XRD (*X-ray Diffractometer*) ve GPC (*Gel Permeation Chromatography*) deneyleri bu kimyasal deney yöntemleri arasında en önemlileri olarak göze çarpmaktadır. DSC deneyinde bağlayıcı numunesi ısıtma ve soğutma işlemlerine tabi tutularak numunenin iç yapısında meydana gelen geçişler belirlenmekte, elden edilen camsı geçiş sıcaklığı ve endotermik pik enerji gibi parametrelerle numunenin ısıl hassasiyeti değerlendirilmektedir. TGA deneyinde numune yüksek sıcaklıklara maruz bırakılarak, numunenin iç yapısının bozulduğu sıcaklık değerleri belirlenmektedir. XRD deneyinde numunelerin kristal yapıları incelenmektedir. GPC deneyinde numunelerin çeşitli koşullandırmalar veya modifikasyon sonrası moleküler ağırlıklarında meydana gelen değişimler tespit edilebilmektedir.

#### 4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, bitüm modifikasyonu üzerine son iki yıl içerisinde yazılmış ve ilgili alandaki önemli dergilerde yayınlanmış makaleler derlenerek üzerinde çeşitli incelemeler yapılmıştır. Bu doğrultuda, çalışmaların yürütüldüğü ülkeler, çalışmalarda kullanılan katkı maddeleri ile bunların kullanım sıklıkları, kompozit modifikasyonda birlikte kullanılan katkı maddeleri ve tercih edilen deneysel yöntemler analiz edilmiştir. Çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde özetlenmiştir:

Bitüm modifikasyonu ile ilgili yapılan çalışmaların büyük bir çoğunluğu Çinli araştırmacılar tarafından yürütülmektedir. Bunun sebebi, ilgili ülkedeki araştırmacı sayısının diğer ülkelere kıyasla oldukça fazla olmasıdır.

Katkı maddelerinin çalışmalardaki kullanım sıklıkları incelendiğinde, en yaygın olarak SBS katkı maddesinin kullanıldığı görülmüştür. Bunun sebebi olarak, ilgili katkı maddesinin hem literatürde hem de uygulamada kendini ispatlamış olması düşünülebilir.

Katkı maddelerinin kullanım sıklıkları analizinde, yağlar, kauçuklar ve PE'ler gibi atık temelli katkı maddelerinin büyük bir alan kapladığı anlaşılmaktadır. Bu durum, atık malzemelerinin bitüm modifikasyonunda sürdürülebilir ve çevre dostu asfalt kaplama inşaatı için kullanımının büyük bir potansiyel taşıdığını göstermektedir.

İncelenen makalelerin büyük çoğunluğunda kompozit modifikasyona yer verildiği tespit edilmiş olup SBS, kauçuk ve yağ katkı maddelerinin kompozit modifikasyon kombinasyonları içerisinde sıklıkla kullanıldıkları görülmüştür.



Güncel çalışmalarda bitüm performansının incelenmesinde DSR cihazı ile yürütülen MSCR deneyinin yaygınlaştığı belirlenmiştir. Bunun sebebi olarak, bu deneyin bitümlerin performans sınıflandırılmasında şartnamelere dahil edilmesi gösterilebilir.

Bitüm modifikasyonunda kullanılan güncel katkı maddelerinin ve deneysel yöntemlerin incelendiği bu çalışmanın, konu üzerinde araştırma yapmaya başlayacak yüksek lisans ve doktora seviyelerindeki öğrencilere fayda sağlayacağı düşünülmektedir. Bununla birlikte, çalışmada dergi sayısı sınırlandırılmış olup bir ekip çalışmasıyla bu sınır kaldırılarak kapsamı daha geniş bir derleme çalışması ilerleyen zamanlarda düşünülebilir.

### Yazar Katkı Oranları

Çalışmanın Tasarlanması (Design of Study): AK(%50), EBP(%50)

Veri Toplanması (Data Acquisition): AK(%50), EBP(%50)

İstatistiksel (Data Analysis): AK(%50), EBP(%50)

Makalenin Yazımı (Writing Up): AK(%50), EBP(%50)

### KAYNAKLAR

- [1] M.Z. Chen, B.B. Leng, S.P. Wu, Y. Sang, "Physical, chemical and rheological properties of waste edible vegetable oil rejuvenated asphalt binders," *Construction and Building Materials*, c. 66, s. ss. 286-298, 2014.
- [2] M. Attaelmanan, C.P. Feng, A.H. Al, "Laboratory evaluation of HMA with high density polyethylene as a modifier," *Construction and Building Materials*, c. 25, s. 5, ss. 2764-2770, 2011.
- [3] H. Bahia, *Bibliographies for Physical Properties of Asphalt Cement*, in *Strategic Highway Research Program*. 1993, The Pennsylvania Transportation Institute: Washington, DC.
- [4] S. Oruc, B. Yilmaz, K. Sancak, "Effect of boron-containing additives on rheological properties of asphalt binder," *Road Materials and Pavement Design*, c. 17, s. 4, ss. 810-824, 2016.
- [5] P. Ahmedzade, "The investigation and comparison effects of SBS and SBS with new reactive terpolymer on the rheological properties of bitumen," *Construction and Building Materials*, c. 38, s. ss. 285-291, 2013.
- [6] R.N. Hunter, A. Self, J. Read, *The Shell Bitumen Handbook*. Sixth Edition ed. 2015, London: ICE Publishing. 788.
- [7] D. Arslan, M. Guru, M.K. Cubuk, M. Cubuk, "Improvement of bitumen and bituminous mixtures performances by triethylene glycol based synthetic polyboron," *Construction and Building Materials*, c. 25, s. 10, ss. 3863-3868, 2011.
- [8] B.V. Kok, M. Yilmaz, M. Guler, "Evaluation of high temperature performance of SBS plus Gilsonite modified binder," *Fuel*, c. 90, s. 10, ss. 3093-3099, 2011.
- [9] A. Perez-Lepe, F.J. Martinez-Boza, C. Gallegos, O. Gonzalez, M.E. Munoz, A. Santamaria, "Influence of the processing conditions on the rheological behaviour of polymer-modified bitumen," *Fuel*, c. 82, s. 11, ss. 1339-1348, 2003.
- [10] M. Ameri, A. Mansourian, S.S. Ashani, G. Yadollahi, "Technical study on the Iranian Gilsonite as an additive for modification of asphalt binders used in pavement construction," *Construction and Building Materials*, c. 25, s. 3, ss. 1379-1387, 2011.
- [11] J. Connan, M.K. Jones, D.E.G. Briggs, G. Eglinton, E. Hagelberg, "Use and trade of bitumen in antiquity and prehistory: molecular archaeology reveals secrets of past civilizations," *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, c. 354, s. 1379, ss. 33-50, 1999.

- [12] D. Lesueur, "The colloidal structure of bitumen: Consequences on the rheology and on the mechanisms of bitumen modification," *Advances in Colloid and Interface Science*, c. 145, s. 1-2, ss. 42-82, 2009.
- [13] D. Lesueur, J.-F. Gérard, P. Claudy, J.-M. Létoffé, J.-P. Planche, D. Martin, "Relationships between the structure and the mechanical properties of paving grade asphalt cements," *J. Assoc. Asphalt Paving Techn.*, c. 66, s. ss. 486-507, 1997.
- [14] M. Jasso, R. Hampl, O. Vacin, D. Bakos, J. Stastna, L. Zanzotto, "Rheology of conventional asphalt modified with SBS, Elvaloy and polyphosphoric acid," *Fuel Processing Technology*, c. 140, s. ss. 172-179, 2015.
- [15] A. Topal, M. Yılmaz, B.V. Kok, N. Kuloglu, B. Sengoz, "Evaluation of Rheological and Image Properties of Styrene-Butadiene-Styrene and Ethylene-Vinyl Acetate Polymer Modified Bitumens," *Journal of Applied Polymer Science*, c. 122, s. 5, ss. 3122-3132, 2011.
- [16] G.D. Airey, "Rheological evaluation of ethylene vinyl acetate polymer modified bitumens," *Construction and Building Materials*, c. 16, s. 8, ss. 473-487, 2002.
- [17] U. Isacsson, X. Lu, "Testing and Appraisal of Polymer-Modified Road Bitumens - State-of-the-Art," *Materials and Structures*, c. 28, s. 177, ss. 139-159, 1995.
- [18] Z. Suo, W.G. Wong, "Nonlinear properties analysis on rutting behaviour of bituminous materials with different air void contents," *Construction and Building Materials*, c. 23, s. 12, ss. 3492-3498, 2009.
- [19] S. Tayfur, H. Ozen, A. Aksoy, "Investigation of rutting performance of asphalt mixtures containing polymer modifiers," *Construction and Building Materials*, c. 21, s. 2, ss. 328-337, 2007.
- [20] A.I. Al-Hadidy, Y.Q. Tan, "Mechanistic analysis of ST and SBS-modified flexible pavements," *Construction and Building Materials*, c. 23, s. 8, ss. 2941-2950, 2009.
- [21] B. Sengoz, A. Topal, "Use of asphalt roofing shingle waste in HMA," *Construction and Building Materials*, c. 19, s. 5, ss. 337-346, 2005.
- [22] M. Yılmaz, B.V. Kok, N. Kuloglu, "Effects of using asphaltite as filler on mechanical properties of hot mix asphalt," *Construction and Building Materials*, c. 25, s. 11, ss. 4279-4286, 2011.
- [23] B. Brule, Y. Brion, A. Tanguy, *Paving asphalt polymer blends: Relationships between composition, structure and properties (with discussion)*, in *Association of Asphalt Paving Technologists Proc.* 1988, p. 41-64.
- [24] J. Collins, M. Bouldin, R. Gelles, A. Berker, "Improved performance of paving asphalts by polymer modification (with discussion)," *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, c. 60, s. ss. 43-79, 1991.
- [25] J.L. Goodrich, "Asphaltic binder rheology, asphalt concrete rheology and asphalt concrete mix properties (with discussion)," *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, c. 60, s. ss. 80-120, 1991.
- [26] G.N. King, H.W. King, P. Chaverot, J. Planche, O. Harders, *Using European wheel-tracking and restrained tensile tests to validate SHRP performance-graded binder specifications for polymer modified asphalts*, in *5th Eurobitume Congress*. 1993: Stockholm, Sweden.
- [27] Y. Yidirim, "Polymer modified asphalt binders," *Construction and Building Materials*, c. 21, s. 1, ss. 66-72, 2007.
- [28] KGM, *Karayolu Teknik Şartnamesi*. 2013: Ankara.
- [29] D. Nasr, R. Babagoli, M. Rezaei, P.R. Borujeni, "Evaluating the substitution potential of SBS with crumb rubber-polypropylene blends as asphalt binder and mixture modifiers," *Construction and Building Materials*, c. 359, s. ss. 129503, 2022.
- [30] M. Zarei, E. Tabasi, M. Ghandehari, M. Rezaie, M.W. Khordehbinan, M. Al-Bahrani, "Effect of hospital waste pyrolysis hydrocarbon (HWPCH) on fracture behavior of Warm Mix asphalt (WMA) under freeze-thaw damage (FTD)," *Construction and Building Materials*, c. 359, s. ss. 129473, 2022.
- [31] M. Zarei, M.R. Taghizadeh, S.S. Moayedji, A. Naseri, M. Al-Bahrani, M.W. Khordehbinan, "Evaluation of fracture behavior of Warm mix asphalt (WMA) modified with hospital waste pyrolysis carbon black (HWPCB) under freeze-thaw damage (FTD) at low and intermediate temperatures," *Construction and Building Materials*, c. 356, s. ss. 129184, 2022.
- [32] M. Zarei, A. Salehikalām, E. Tabasi, A. Naseri, M. Worya Khordehbinan, M. Negahban, "Pure mode I fracture resistance of hot mix asphalt (HMA) containing nano-SiO<sub>2</sub> under freeze-thaw damage (FTD)," *Construction and Building Materials*, c. 351, s. ss. 128757, 2022.
- [33] D. Nasr, R. Babagoli, M. Mazrouei, "Evaluation of rheological behavior of asphalt binder modified by recycled polyethylene wax and crumb rubber," *Construction and Building Materials*, c. 328, s. ss. 127069, 2022.
- [34] A. Khavandi Khiavi, M. Asadi, "Effect of specific heat capacity of aggregates and nano-graphite on self-healing of hot mix asphalt under microwave radiation," *Construction and Building Materials*, c. 328, s. ss. 127091, 2022.
- [35] M. Fakhri, E. Shahryari, T. Ahmadi, "Investigate the use of recycled polyvinyl chloride (PVC) particles in improving the mechanical properties of stone mastic asphalt (SMA)," *Construction and Building Materials*, c. 326, s. ss. 126780, 2022.

- [36] M. Fakhri, M.A. Norouzi, "Rheological and ageing properties of asphalt bio-binders containing lignin and waste engine oil," *Construction and Building Materials*, c. 321, s. ss. 126364, 2022.
- [37] A.M. Yarahmadi, G. Shafabakhsh, A. Asakereh, "Laboratory investigation of the effect of nano Caco3 on rutting and fatigue of stone mastic asphalt mixtures," *Construction and Building Materials*, c. 317, s. ss. 126127, 2022.
- [38] S. Fatemi, S.A. Saadatjoo, R. Babagoli, J. Bolouri Bazaz, "Rheological evaluation of asphalt binder modified by amorphous poly alpha olefin (APO)," *Construction and Building Materials*, c. 314, s. ss. 125371, 2022.
- [39] R. Babagoli, A. Ameli, S. Asadi, "Effects of copolymers on rheological and performance of binders and stone matrix asphalt mixtures," *International Journal of Pavement Engineering*, c. s. ss. 1-19, 2022.
- [40] H. Ziari, A. Habibnejad Korayem, M. Hajiloo, M. Shisheboran, A. Moniri, "Rutting-resistance investigation of amorphous carbon powder modified binder and asphalt mixture containing siliceous aggregates," *International Journal of Pavement Engineering*, c. s. ss. 1-12, 2022.
- [41] M. Ameri, S.V. Abdipour, A.R. Yengejeh, M. Shahsavari, A.A. Yousefi, "Evaluation of rubberised asphalt mixture including natural Zeolite as a warm mix asphalt (WMA) additive," *International Journal of Pavement Engineering*, c. s. ss. 1-12, 2022.
- [42] M. Jafari, A. Babazadeh, M. Shahri, "The role of stress sensitivity of modified binders with the same linear viscoelastic properties in evaluating rutting resistance of asphalt mixtures," *International Journal of Pavement Engineering*, c. s. ss. 1-18, 2022.
- [43] M. Favakeh, S. Bazzgir, M. Karbasi, M.Z. Alavi, A. Abdi, "Evaluation of elastomer-plastomer vulcanised modifiers for using as bitumen binder modifier," *International Journal of Pavement Engineering*, c. 23, s. 2, ss. 148-159, 2022.
- [44] H. Yeşilçiçek, Ş. Oruç, M. Gülfir Bozdemir, "Characterization and rheological properties of asphalt binder with a novel tall oil-based boron additive to enhance asphalt performance," *Construction and Building Materials*, c. 359, s. ss. 129510, 2022.
- [45] E. Yalcin, A. Demirbag, "Effects of modified binders obtained from different polymers on conventional and rheological properties," *Construction and Building Materials*, c. 357, s. ss. 129366, 2022.
- [46] Ş. Oruç, B. Yılmaz, K. Sancak, "Characterization and rheological behavior of asphalt binder modified by a novel cyclic borate ester additive," *Construction and Building Materials*, c. 348, s. ss. 128673, 2022.
- [47] B.V. Kök, B. İrhan, M. Yılmaz, E. Yalçın, "Research on the rheological properties of bitumen modified with waste photopolymer," *Construction and Building Materials*, c. 346, s. ss. 128446, 2022.
- [48] E. Yalcin, A. Munir Ozdemir, B. Vural Kok, M. Yılmaz, B. Yılmaz, "Influence of pandemic waste face mask on rheological, physical and chemical properties of bitumen," *Construction and Building Materials*, c. 337, s. ss. 127576, 2022.
- [49] A. Kumandaş, E. Çavdar, Ş. Oruç, E.B. Pancar, B.V. Kök, "Effect of WCO addition on high and low-temperature performance of RET modified bitumen," *Construction and Building Materials*, c. 323, s. ss. 126561, 2022.
- [50] T. Günay, P. Ahmedzade, S. Hassanpour-Kasanagh, A.M. Fainleib, O. Starostenko, "Effect of maleic anhydride grafted and gamma-irradiated waste polypropylene on rheological properties of asphalt binder," *International Journal of Pavement Engineering*, c. 23, s. 13, ss. 4819-4830, 2022.
- [51] A. Pandey, S. Sohail Islam, G.D. Ransinchung R.N, S.S. Ravindranath, "Quantifying the effect of SBS molecular structure on the upper service temperature rheological properties of modified binders," *Construction and Building Materials*, c. 352, s. ss. 128826, 2022.
- [52] S. Girimath, D. Singh, B. Rajan, "Performance evaluation and mechanistic-empirical design of bio-oil modified asphalt mixes," *Construction and Building Materials*, c. 325, s. ss. 126735, 2022.
- [53] P.K. Ashish, D. Singh, "Performance-based laboratory evaluation of asphaltic mixture containing asphalt binder-Carbon Nano Tube composite," *Road Materials and Pavement Design*, c. 23, s. 6, ss. 1370-1389, 2022.
- [54] S.K. Patra, M. Panda, A.K. Das, P.K. Bhuyan, "Performance evaluation of surface-treated montmorillonite nanoclay-modified bitumen binder at high- and intermediate-temperature conditions," *Road Materials and Pavement Design*, c. s. ss. 1-23, 2022.
- [55] B. Singh, P. Kumar, "Investigating the performance of polymer and warm mix modified asphalt binders and mixtures," *International Journal of Pavement Engineering*, c. 23, s. 11, ss. 3691-3705, 2022.
- [56] A. Zahid, S. Ahmed, M. Irfan, "Experimental investigation of nano materials applicability in Hot Mix Asphalt (HMA)," *Construction and Building Materials*, c. 350, s. ss. 128882, 2022.
- [57] M.A. Tarar, A.H. Khan, Z.u. Rehman, "Evaluation of effects of soybean derived oil and aggregate petrology on the performance of asphalt mixes," *Road Materials and Pavement Design*, c. 23, s. 2, ss. 308-334, 2022.
- [58] S. Abbas, S.B.A. Zaidi, I. Ahmed, "Performance evaluation of asphalt binders modified with waste engine oil and various additives," *International Journal of Pavement Engineering*, c. s. ss. 1-13, 2022.

- [59] M.F. Ahmad, S.B. Ahmed Zaidi, A. Fareed, N. Ahmad, I. Hafeez, "Assessment of sugar cane bagasse bio-oil as an environmental friendly alternative for pavement engineering applications," *International Journal of Pavement Engineering*, c. 23, s. 8, ss. 2761-2772, 2022.
- [60] M.A. Nisar, S.B.A. Zaidi, A. Fareed, J.S. Carvajal-Munoz, I. Ahmed, "Performance evaluation of Nano wood ashes in asphalt binder and mixture," *International Journal of Pavement Engineering*, c. 23, s. 10, ss. 3318-3332, 2022.
- [61] A. Hazoor Ansari, F.M. Jakarni, R. Muniandy, S. Hassim, Z. Elahi, M. Meftah Ben Zair, "Effect of cup lump rubber as a sustainable bio-modifier on the properties of bitumen incorporating polyphosphoric acid," *Construction and Building Materials*, c. 323, s. ss. 126505, 2022.
- [62] S.N.A. Jeffry, R. Putra Jaya, N. Abdul Hassan, H. Yaacob, M.Z.H. Mahmud, Z.H. Al-Saffar, "The influence of nano-carbon from coconut shell ash as modifier on the properties of bitumen," *Road Materials and Pavement Design*, c. 23, s. 4, ss. 770-786, 2022.
- [63] A. Al-Sabaeei, M. Napiyah, M. Sutanto, N.Z. Habib, N. Bala, I. Kumalasari, A. Ghaleb, "Application of nano silica particles to improve high-temperature rheological performance of tyre pyrolysis oil-modified bitumen," *Road Materials and Pavement Design*, c. 23, s. 9, ss. 1999-2017, 2022.
- [64] I.B. Joohari, F. Giustozzi, "Waste tyres crumb rubber as a sustainability enhancer for polymer-modified and hybrid polymer-modified bitumen," *International Journal of Pavement Engineering*, c. 23, s. 12, ss. 4357-4371, 2022.
- [65] A.M. Al-Sabaeei, M.B. Napiyah, M.H. Sutanto, W.S. Alaloul, N.I.M. Yusoff, F.H. Khairuddin, A.M. Memon, "Evaluation of the high-temperature rheological performance of tire pyrolysis oil-modified bio-asphalt," *International Journal of Pavement Engineering*, c. 23, s. 11, ss. 4007-4022, 2022.
- [66] I.A. Abdalfattah, W.S. Mogawer, K. Stuart, "Recycled polyethylene (RPE) modified asphalt mixtures: Performance predictions using pavement Mechanistic-Empirical design and evaluation of return on investment," *Construction and Building Materials*, c. 356, s. ss. 129164, 2022.
- [67] M. Elwardany, J. Habbouche, A. Andriescu, D.J. Mensching, E.Y. Hajj, M. Piratheepan, "Comprehensive performance evaluation of high polymer-modified asphalt binders beyond linear viscoelastic rheological surrogates," *Construction and Building Materials*, c. 351, s. ss. 128902, 2022.
- [68] Y. Wang, P. Polaczyk, J. He, H. Lu, R. Xiao, B. Huang, "Dispersion, compatibility, and rheological properties of graphene-modified asphalt binders," *Construction and Building Materials*, c. 350, s. ss. 128886, 2022.
- [69] A. Ali, S.F. Kabir, B. Al-Badr, A. Alfalah, Z. Xie, C. Decarlo, M. Elshaer, Y. Mehta, "Laboratory performance of dense graded asphalt mixtures prepared using highly polymer modified binders containing corn oil as softening agent," *Construction and Building Materials*, c. 345, s. ss. 128336, 2022.
- [70] K. Zhang, H. Zhao, S.C. Wang, "Upcycle olive pomace as antioxidant and recycling agent in asphalt paving materials," *Construction and Building Materials*, c. 330, s. ss. 127217, 2022.
- [71] S. Aldagari, S.F. Kabir, E.H. Fini, "A comparative study on efficacy of waste plastic and waste Rubberin bitumen," *Construction and Building Materials*, c. 325, s. ss. 126724, 2022.
- [72] P. Hajjkarimi, A. Sadat Hosseini, E.H. Fini, "Evaluation of the compatibility of waste plastics and bitumen using micromechanical modeling," *Construction and Building Materials*, c. 317, s. ss. 126107, 2022.
- [73] S. Rani, R. Ghabchi, S.A. Ali, M. Zaman, E.A. O'Rear, "Moisture-induced damage potential of asphalt mixes containing polyphosphoric acid and antistripping agent," *Road Materials and Pavement Design*, c. 23, s. 12, ss. 2818-2838, 2022.
- [74] J.J. García Mainieri, P. Singhvi, H. Ozer, B.K. Sharma, I.L. Al-Qadi, "Linear and nonlinear viscoelastic parameters of asphalt binders modified with softening agents," *Road Materials and Pavement Design*, c. s. ss. 1-20, 2022.
- [75] S. Saadeh, Y. Al-Zubi, P. Katawal, B. Zaatarah, E. Fini, "Biochar effects on the performance of conventional and rubberized HMA," *Road Materials and Pavement Design*, c. 24, s. 1, ss. 156-172, 2023.
- [76] R. Ghabchi, M.P. Pereira Castro, "Characterisation of a hybrid plant-based asphalt binder replacement with high reactive phenolic monomer content," *International Journal of Pavement Engineering*, c. 23, s. 13, ss. 4675-4696, 2022.
- [77] J. Zhang, M.S. Sakhaeifar, D.N. Little, "Characterisation of rheological properties of sulfur-extended asphalt with/without crumb rubber," *International Journal of Pavement Engineering*, c. 23, s. 5, ss. 1491-1499, 2022.
- [78] A.A. Jamrah, M.E. Kutay, "A new rheological approach to evaluating the aged performance of Crumb Rubber Modified binders," *International Journal of Pavement Engineering*, c. 23, s. 6, ss. 1897-1910, 2022.
- [79] Y. Meng, Z. Wang, J. Lei, Y. Liao, X. Zhao, Y. Qin, G. Fang, C. Zhang, "Study on aging resistance and micro characteristics of bio-asphalt/TLA composite modified asphalt binder," *Construction and Building Materials*, c. 359, s. ss. 129566, 2022.

- [80] J. Ren, X. Zhang, C. Peng, Y. Wang, Y. Wang, H. Zhao, X. Xu, L. Xia, C. Wang, G. Li, Z. Zhao, J. Chen, J. Wang, "Short-term aging characteristics and mechanisms of SBS-modified bio-asphalt binder considering time-dependent effect," *Construction and Building Materials*, c. 352, s. ss. 129048, 2022.
- [81] S. Chen, Q. Liu, H. Wu, C. Yang, X. Gong, S. Wu, Y. Li, "Simultaneous enhancement of the thermal oxygen and ultraviolet aging resistance of asphalt by incorporating antioxidant intercalated layered double hydroxide," *Construction and Building Materials*, c. 349, s. ss. 128743, 2022.
- [82] H. Duan, J. Long, H. Zhang, H. Luo, J. Cao, "Effects of different carriers for zinc oxide (ZnO) particles on microstructure of ZnO/layered silicate composite and aging resistance of composite modified asphalt," *Construction and Building Materials*, c. 349, s. ss. 128773, 2022.
- [83] H. Wang, N. Li, T. Xu, "Aging effects on microstructures and micromechanical properties of vulcanized eucommia ulmoides gum modified bitumen," *Construction and Building Materials*, c. 346, s. ss. 128432, 2022.
- [84] Y. Tan, J. Zhang, G. Zou, H. Qin, "Aging characterization of rheology and morphology evolution of SBS-modified asphalt," *Construction and Building Materials*, c. 342, s. ss. 128027, 2022.
- [85] C. Li, X. Xie, L. Wang, Y. Guo, L. Zhang, Z. Xue, "Evaluation of the effect of thermal oxygen aging on base and SBS-modified bitumen at micro and macroscales," *Construction and Building Materials*, c. 324, s. ss. 126623, 2022.
- [86] D. Zhang, Y. Zheng, G. Yuan, G. Qian, H. Zhang, Z. You, P. Li, "Chemical characteristics analyze of SBS-modified bitumen containing composite nanomaterials after aging by FTIR and GPC," *Construction and Building Materials*, c. 324, s. ss. 126522, 2022.
- [87] S. Chen, B. Zhang, X. He, Y. Su, Q. Liu, H. Xu, "Research on mechanical-activated nanoscale bentonite and surface aging behavior of its modified asphalt," *Construction and Building Materials*, c. 321, s. ss. 126356, 2022.
- [88] S. Chen, H. Xu, X. He, Y. Su, B. Zhang, Q. Liu, "Oil-grinded recycled kapok fiber as a bio-packing for eco-friendly modified asphalt and its aging resistance behavior," *Construction and Building Materials*, c. 320, s. ss. 126293, 2022.
- [89] D. Zhang, Z. Huang, G. Yuan, Y. Zheng, G. Qian, Z. You, H. Zhang, "Research on the anti-aging mechanism of SBS-modified asphalt compounded with multidimensional nanomaterials based on atomic force microscopy," *Construction and Building Materials*, c. 317, s. ss. 125808, 2022.
- [90] G. Cuciniello, P. Leandri, M. Losa, G. Airey, "Effects of ageing on the damage tolerance of polymer modified bitumens investigated through the LAS test and fluorescence microscopy," *International Journal of Pavement Engineering*, c. 23, s. 4, ss. 1083-1094, 2022.
- [91] J. Zhang, A. He, B. Xie, J. Wang, C. Yan, "Characterization of various modified asphalts using force ductility test with "8" shaped mold and straight mold," *Construction and Building Materials*, c. 356, s. ss. 129251, 2022.
- [92] L. Cheng, L. Zhang, Y. Lei, Y. Ma, C. Yan, "Effect of the laboratory short-term aging temperature on the chemical and rheological characteristics of high modulus asphalts," *Construction and Building Materials*, c. 314, s. ss. 125569, 2022.
- [93] X. Zhu, M. Miljković, Y. Wang, G. Hao, "Property transitions of neat and styrene-butadiene-styrene (SBS)-modified asphalt binders from small, medium to large-amplitude oscillatory shears," *International Journal of Pavement Engineering*, c. s. ss. 1-19, 2022.
- [94] M. Rochlani, S. Leischner, D. Wareham, S. Caro, G.C. Falla, F. Wellner, "Investigating the performance-related properties of crumb rubber modified bitumen using rheology-based tests," *International Journal of Pavement Engineering*, c. 23, s. 3, ss. 877-887, 2022.
- [95] A. Sreeram, A. Filonzi, S. Komaragiri, K. Lakshmi Roja, E. Masad, A. Bhasin, "Assessing impact of chemical compatibility of additives used in asphalt binders: A case study using plastics," *Construction and Building Materials*, c. 359, s. ss. 129349, 2022.
- [96] Z. Xu, H. Wang, T. Xu, "Bituminous modifier selection and effects of dimethyl sulfoxide pretreated graphene contents on bituminous properties," *Construction and Building Materials*, c. 343, s. ss. 128145, 2022.
- [97] X. Jiang, P. Li, Z. Ding, L. Yue, H. Li, H. Bing, J. Zhang, "Physical, chemical and rheological investigation and optimization design of asphalt binders partially replaced by bio-based resins," *Construction and Building Materials*, c. 350, s. ss. 128845, 2022.
- [98] Y. Meng, L. Zhan, C. Hu, Y. Tang, D. Großegger, X. Ye, "Research on modification mechanism and performance of an innovative bio-based polyurethane modified asphalt: A sustainable way to reducing dependence on petroleum asphalt," *Construction and Building Materials*, c. 350, s. ss. 128830, 2022.
- [99] C. Yan, L. Yuan, X. Yu, S. Ji, Z. Zhou, "Characterizing the fatigue resistance of multiple modified asphalts using time sweep test, LAS test and elastic recovery test," *Construction and Building Materials*, c. 322, s. ss. 125806, 2022.

- [100] P. Cong, A. Zhang, W. Ge, Y. Cheng, "Study on macroscopic properties and microstructure of thermosetting polyurethane asphalt binder (PAB) based on curing kinetics," *Construction and Building Materials*, c. 333, s. ss. 127347, 2022.
- [101] Y. Peng, Z. Yu, Y. Long, Y. Li, "Experimental investigation on the effects of a new anti-stripping additive on performance properties of asphalt and its mixtures," *Construction and Building Materials*, c. 353, s. ss. 129173, 2022.
- [102] M. Rafiq Kakar, P. Mikhailenko, Z. Piao, L.D. Poulidakos, "High and low temperature performance of polyethylene waste plastic modified low noise asphalt mixtures," *Construction and Building Materials*, c. 348, s. ss. 128633, 2022.
- [103] A.L. Manfro, J.V. Staub de Melo, J.A. Villena Del Carpio, W.B. Broering, "Permanent deformation performance under moisture effect of an asphalt mixture modified by calcium carbonate nanoparticles," *Construction and Building Materials*, c. 342, s. ss. 128087, 2022.
- [104] Z. Zhao, S. Wu, Q. Liu, J. Xie, C. Yang, F. Wang, P. Wan, "Recycling waste disposable medical masks in improving the performance of asphalt and asphalt mixtures," *Construction and Building Materials*, c. 337, s. ss. 127621, 2022.
- [105] Z. Liu, Z. Wang, "Development of terminal blend rubber and SBS modified asphalt: A case study," *Construction and Building Materials*, c. 334, s. ss. 127459, 2022.
- [106] Y. Mamuye, M.-C. Liao, N.-D. Do, "Nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite on intermediate and high temperature properties of neat and modified asphalt binders and their effect on hot mix asphalt mixtures," *Construction and Building Materials*, c. 331, s. ss. 127304, 2022.
- [107] A. Chen, Q. Deng, Y. Li, T. bai, Z. Chen, J. Li, J. Feng, F. Wu, S. Wu, Q. Liu, C. Li, "Harmless treatment and environmentally friendly application of waste tires—TPCB/TPO composite-modified bitumen," *Construction and Building Materials*, c. 325, s. ss. 126785, 2022.
- [108] Y. Meng, J. Lei, R. Zhang, X. Yang, Q. Zhao, Y. Liao, Y. Hu, "Effect of geopolymers as an additive on the mechanical performance of asphalt," *Road Materials and Pavement Design*, c. 23, s. 11, ss. 2466-2485, 2022.
- [109] A. Filonzi, S. Komaragiri, K. Lakshmi Roja, A. Sreeram, A. Bhasin, E. Masad, "A comprehensive evaluation of mixture and binder properties to explore the use of low-density polyethylene (LDPE) as an asphalt modifier and co-modifier," *International Journal of Pavement Engineering*, c. s. ss. 1-11, 2022.
- [110] I. Holleran, E. Masad, D.J. Wilson, J. Malmstrom, G. Holleran, E. Alrashdyah, "Effect of reactive ethylene terpolymer modification on bitumen's microstructure, rheology, and porous asphalt mix properties," *International Journal of Pavement Engineering*, c. s. ss. 1-21, 2022.
- [111] A.M. Adnan, X. Luo, C. Lü, J. Wang, Z. Huang, "Physical properties of graphene-oxide modified asphalt and performance analysis of its mixtures using response surface methodology," *International Journal of Pavement Engineering*, c. 23, s. 5, ss. 1378-1392, 2022.
- [112] J. Huang, G. Shiva Kumar, J. Ren, Y. Sun, Y. Li, C. Wang, "Towards the potential usage of eggshell powder as bio-modifier for asphalt binder and mixture: workability and mechanical properties," *International Journal of Pavement Engineering*, c. 23, s. 10, ss. 3553-3565, 2022.
- [113] Z. Ju, D. Ge, Z. Wu, Y. Xue, S. Lv, Y. Li, X. Fan, "The performance evaluation of high content bio-asphalt modified with polyphosphoric acid," *Construction and Building Materials*, c. 361, s. ss. 129593, 2022.
- [114] S. Cui, N. Guo, L. Wang, Z. You, Y. Tan, Z. Guo, X. Luo, Z. Chen, "Effect of Freeze-Thaw cycles on the pavement performance of SBS modified and composite crumb rubber modified asphalt mixtures," *Construction and Building Materials*, c. 342, s. ss. 127799, 2022.
- [115] K. Yan, G. Li, Q. Li, A. Diab, L. You, M. Wang, "Compound modification of asphalt mixture using ethylene-vinyl acetate copolymer and amorphous poly alpha olefin," *Construction and Building Materials*, c. 341, s. ss. 127705, 2022.
- [116] K. Yan, Y. Li, Z. Long, L. You, M. Wang, M. Zhang, A. Diab, "Mechanical behaviors of asphalt mixtures modified with European rock bitumen and waste cooking oil," *Construction and Building Materials*, c. 319, s. ss. 125909, 2022.
- [117] X. Shi, H. Zhang, X. Bu, G. Zhang, H. Zhang, H. Kang, "Performance evaluation of BDM/unsaturated polyester resin-modified asphalt mixture for application in bridge deck pavement," *Road Materials and Pavement Design*, c. 23, s. 3, ss. 684-700, 2022.
- [118] A. Subhy, D. Lo Presti, G. Airey, P. Edwards, "Rubberised stone mastic asphalt mixtures: a performance-related evaluation," *Road Materials and Pavement Design*, c. s. ss. 1-21, 2022.
- [119] T. López-Montero, R. Miró, A. Martínez, "Effect of the use of Marpol waste as a partial replacement of the binder for the manufacture of more sustainable bituminous mixtures," *International Journal of Pavement Engineering*, c. s. ss. 1-15, 2022.

- [120] A.M. Adnan, C. Lü, X. Luo, J. Wang, G. Liu, "Fracture properties and potential of asphalt mixtures containing graphene oxide at low and intermediate temperatures," *International Journal of Pavement Engineering*, c. s. ss. 1-17, 2022.
- [121] J. Ren, D. Li, Y. Xu, J. Huang, W. Liu, "Fatigue behaviour of rock asphalt concrete considering moisture, high-temperature, and stress level," *International Journal of Pavement Engineering*, c. 23, s. 13, ss. 4638-4648, 2022.
- [122] K. Yan, S. Wang, D. Ge, J. Chen, S. Tian, H. Sun, "Laboratory performance of asphalt mixture with waste tyre rubber and APAO modified asphalt binder," *International Journal of Pavement Engineering*, c. 23, s. 1, ss. 59-69, 2022.
- [123] M. Shahin, T.U. Ahmed, M.N. Bari, M.A. Sobhan, "Effects of soaking on compressive strength of recycled polymer modified asphalt," *International Journal of Pavement Engineering*, c. 23, s. 5, ss. 1634-1644, 2022.
- [124] H. Hao, A. Zhang, Y. Cheng, P. Cong, "The modification mechanisms of silane coupling agent (SCA) on the physical properties of thermosetting polyurethane asphalt binder (PUAB)," *Construction and Building Materials*, c. 350, s. ss. 128836, 2022.
- [125] H. Liu, Z. Zhang, Y. Zhu, J. Sun, L. Wang, T. Huang, L. Chen, "Modification of asphalt using polyurethanes synthesized with different isocyanates," *Construction and Building Materials*, c. 327, s. ss. 126959, 2022.
- [126] N. Xu, H. Wang, Y. Chen, M. Miljković, P. Feng, H. Ding, "Thermal storage stability and rheological properties of multi-component styrene-butadiene-styrene composite modified bitumen," *Construction and Building Materials*, c. 322, s. ss. 126494, 2022.
- [127] B. Liang, Y. Chen, F. Lan, J. Zheng, "Evaluation of rheological and aging behavior of modified asphalt based on activation energy of viscous flow," *Construction and Building Materials*, c. 321, s. ss. 126347, 2022.
- [128] J. Sun, Z. Zhang, L. Wang, H. Liu, X. Ban, J. Ye, "Investigation on the epoxy/polyurethane modified asphalt binder cured with bio-based curing agent: Properties and optimization," *Construction and Building Materials*, c. 320, s. ss. 126221, 2022.
- [129] C. Xia, Y. Guo, S. Lv, B. Liu, T. Liu, S. Zhao, Y. Liu, "Investigation on performance and mechanism of grafting activated waste leather powder modified asphalt," *Construction and Building Materials*, c. 320, s. ss. 126208, 2022.
- [130] M. Jia, A. Sha, J. Lin, Z. Zhang, B. Qi, D. Yuan, "Polyurethane asphalt binder: a promising candidate for steel bridge deck-paving material," *International Journal of Pavement Engineering*, c. 23, s. 11, ss. 3920-3929, 2022.
- [131] Z. Hong, K. Yan, M. Wang, J. Yuan, D. Ge, J. Liu, "The laboratory performance of asphalt mixture with thermoplastic polyurethane (TPU) and amorphous poly alpha olefin (APO) compound modified asphalt binder," *Construction and Building Materials*, c. 349, s. ss. 128742, 2022.
- [132] J. Li, S. Wang, Y. Liu, H. Lin, R. Pei, Y. Muhammad, "Performance and mechanism evaluation of dopamine-hexamethylene diamine-iron tetraoxide composite rubber powder incorporated styrene-butadiene-styrene modified asphalt," *Construction and Building Materials*, c. 351, s. ss. 128953, 2022.
- [133] J. Li, S. Wang, Y. Muhammad, H. Zhang, Q. Qiao, "Synthesis of Hydroxyapatite-Polydopamine-Rubber powder modifier via in-situ growth strategy for the designing of HAP-PDA-RP/SBS modified asphalt," *Construction and Building Materials*, c. 345, s. ss. 128361, 2022.
- [134] S. Xing, Y. Muhammad, Y. Chen, Z. Li, D. Ren, Z. Zhao, J. Li, "Preparation and performance evaluation of surface-modified polyacrylonitrile fiber and SBS composite modified asphalt binder based on bionic hierarchy," *Construction and Building Materials*, c. 326, s. ss. 126866, 2022.
- [135] T. Bai, F. Wu, Y. Zhang, C. Mao, G. Wang, Y. Wu, H. Bai, Y. Li, "Sulfur modification with dipentene and ethylhexyl acrylate to enhance asphalt mixture performance," *Construction and Building Materials*, c. 343, s. ss. 128086, 2022.
- [136] Z. Zhao, S. Wu, Q. Liu, C. Yang, Y. Zou, P. Wan, "Feasibility assessment of CeO<sub>2</sub> nanoparticles as aging-resistant agent of asphalt," *Construction and Building Materials*, c. 330, s. ss. 127245, 2022.
- [137] R. Gallu, F. Méchin, J.-F. Gérard, F. Dalmas, "Influence of the chain extender of a segmented polyurethane on the properties of polyurethane-modified asphalt blends," *Construction and Building Materials*, c. 328, s. ss. 127061, 2022.
- [138] N.H. Carreño Gómez, O. Fleischel, M. Oeser, "Thermal ageing behaviour of isocyanate-based bitumen additive," *Construction and Building Materials*, c. 327, s. ss. 126932, 2022.
- [139] G. Bian, L. Qi, J. Liu, X. Wang, X. Xu, Z. Wang, "Effects of tetraethyl orthosilicate on rheological behaviors of crumb rubber modified asphalt," *Construction and Building Materials*, c. 325, s. ss. 126807, 2022.
- [140] J. Dai, F. Ma, Z. Fu, C. Li, D. Wu, K. Shi, W. Dong, Y. Wen, M. Jia, "Assessing the direct interaction of asphalt binder with stearic acid/palmitic acid binary eutectic phase change material," *Construction and Building Materials*, c. 320, s. ss. 126251, 2022.

- [141] C. Li, F. Ma, Z. Fu, J. Dai, Y. Wen, K. Shi, "Using Cereclor plasticizer to modify the virgin asphalt binder: A case of rheological properties improvement," *Construction and Building Materials*, c. 318, s. ss. 126039, 2022.
- [142] I. Camargo, B. Hofko, J. Mirwald, "Effect of DLTPD and furfural on asphalt binders: Optimal dosage and PG grading," *Construction and Building Materials*, c. 314, s. ss. 125489, 2022.
- [143] X. Yang, G. Wang, M. Liang, T. Yuan, H. Rong, "Effect of aluminum hydroxide (ATH) on flame retardancy and smoke suppression properties of SBS-modified asphalt," *Road Materials and Pavement Design*, c. 24, s. 1, ss. 173-190, 2023.
- [144] Z. Fu, S. Liu, F. Ma, X. Guo, C. Li, J. Dai, M. Lin, "Low-temperature rheological properties and micro-mechanism of DIBCH plasticizer modified bitumen," *International Journal of Pavement Engineering*, c. s. ss. 1-11, 2021.
- [145] Z. Fu, K. Shi, F. Ma, R.-m. Song, L. Chen, J.-s. Dai, W.-q. Shen, "Rheological properties of dioctyl adipate-modified asphalt binder," *International Journal of Pavement Engineering*, c. 23, s. 8, ss. 2644-2653, 2022.
- [146] J. Xu, Z. Guo, G. Lu, Z. Fan, D. Wang, M. Oeser, "Reclamation of waste oils in asphalt modification towards enhanced low-temperature performance of pavement in cold region," *International Journal of Pavement Engineering*, c. s. ss. 1-16, 2022.
- [147] Z. Zhang, L. Chen, J. Peng, J. Sun, D. Zhang, X. Li, F. Wen, H. Liu, "Preparation and properties of a novel high-viscosity modified bitumen," *Construction and Building Materials*, c. 344, s. ss. 128183, 2022.
- [148] Y. Zhu, G. Xu, T. Ma, J. Fan, S. Li, "Performances of rubber asphalt with middle/high content of waste tire crumb rubber," *Construction and Building Materials*, c. 335, s. ss. 127488, 2022.
- [149] F. Xiao, Q. Zong, J. Wang, J. Chen, J. Liu, "Storage stability characterization and improvement of SBS and crumb rubber composite modified asphalt," *Road Materials and Pavement Design*, c. 23, s. 3, ss. 509-526, 2022.
- [150] Q. Liu, J. Liu, B. Yu, J. Zhang, J. Pei, "Evaluation and optimization of asphalt binder and mixture modified with high activated crumb rubber content," *Construction and Building Materials*, c. 314, s. ss. 125676, 2022.
- [151] C. Yan, W. Huang, J. Xu, H. Yang, Y. Zhang, H.U. Bahia, "Quantification of re-refined engine oil bottoms (REOB) in asphalt binder using ATR-FTIR spectroscopy associated with partial least squares (PLS) regression," *Road Materials and Pavement Design*, c. 23, s. 4, ss. 958-972, 2022.
- [152] Q. Liu, J. Liu, B. Yu, J. Zhang, J. Pei, Y. Wen, "Preparation and investigation on terminal blend asphalt binders with high content of activated crumb rubber," *International Journal of Pavement Engineering*, c. s. ss. 1-15, 2021.
- [153] M. Li, C. Luo, L. Zhu, H. Li, P. Cong, Y. Feng, L. Yan, "A novel epoxy-terminated polyethylene modified asphalt with low-viscosity and high storage stability," *Construction and Building Materials*, c. 335, s. ss. 127473, 2022.
- [154] K. Hu, C. Yu, Q. Yang, Z. Li, W. Zhang, T. Zhang, Y. Feng, "Mechanistic study of graphene reinforcement of rheological performance of recycled polyethylene modified asphalt: A new observation from molecular dynamics simulation," *Construction and Building Materials*, c. 320, s. ss. 126263, 2022.
- [155] M. Tušar, M.R. Kakar, L.D. Poulikakos, E. Pasquini, A. Baliello, M. Pasetto, L. Porot, D. Wang, A. Cannone Falchetto, D. Dalmazzo, D. Lo Presti, G. Giancontieri, A. Varveri, R. Veropalumbo, N. Viscione, K. Vasconcelos, A. Carter, "RILEM TC 279 WMR round robin study on waste polyethylene modified bituminous binders: advantages and challenges," *Road Materials and Pavement Design*, c. s. ss. 1-29, 2022.
- [156] C. Li, J. Gong, R. Zhao, Z. Xi, Q. Wang, H. Xie, "Laboratory performance of recycled polyethylene modified epoxy asphalt binders," *International Journal of Pavement Engineering*, c. s. ss. 1-11, 2022.
- [157] E.S. Okhotnikova, Y.M. Ganeeva, I.N. Frolov, T.N. Yusupova, G.R. Fazylyzhanova, "Structural characterization and application of bitumen modified by recycled polyethylenes," *Construction and Building Materials*, c. 316, s. ss. 126118, 2022.
- [158] I. Binti Joohari, F. Giustozzi, "Oscillatory shear rheometry of hybrid polymer-modified bitumen using multiple stress creep and recovery and linear amplitude sweep tests," *Construction and Building Materials*, c. 315, s. ss. 125791, 2022.
- [159] Z. Hong, K. Yan, M. Wang, L. You, D. Ge, "Low-density polyethylene/ethylene-vinyl acetate compound modified asphalt: Optimal preparation process and high-temperature rheological properties," *Construction and Building Materials*, c. 314, s. ss. 125688, 2022.
- [160] B. Fethiza Ali, K. Soudani, S. Haddadi, "Effect of waste plastic and crumb rubber on the thermal oxidative aging of modified bitumen," *Road Materials and Pavement Design*, c. 23, s. 1, ss. 222-233, 2022.
- [161] T. Xia, X. Chen, J. Xu, W. Chen, X. Huang, Y. Li, "Properties of bitumen modified by polyethylene and polyethylene glycol with different molecular weights," *International Journal of Pavement Engineering*, c. 23, s. 11, ss. 3941-3948, 2022.
- [162] Z. Ren, L. Huang, Z. Li, Z. Gu, Y. Tan, "Effect of reclaimed bio-oil and waste crumb rubber on bitumen visco-elasticity," *International Journal of Pavement Engineering*, c. s. ss. 1-11, 2022.
- [163] Y. Sheng, A.T. Ahmed, H. Jia, Y. Wu, P. Guo, Y. Li, Y. Qiao, "Preparation and characterization of low flammable asphalt for tunnel pavements," *Construction and Building Materials*, c. 359, s. ss. 129559, 2022.



- [164] X. Zha, R. Lv, H. Hu, H. Chen, Z. Wang, "Preparation and experimental research on the properties of neodymium iron boron magnetic powder modified asphalt," *Construction and Building Materials*, c. 321, s. ss. 126392, 2022.
- [165] P. Zhao, X. Song, M. Dong, H. Sun, W. Wu, R. Zhang, M. Sun, X. Zhao, "Preparation and characterization of CQDs/SBS composites and its application performance as asphalt modifier," *Construction and Building Materials*, c. 320, s. ss. 126312, 2022.
- [166] M. Han, Y. Tan, A. Meng, X. Xiong, Y. Wang, H. Lv, "Preparation of chemical-physical hybrid crosslinking double network gel composite incorporated SBS modified asphalt," *International Journal of Pavement Engineering*, c. s. ss. 1-15, 2022.
- [167] Q. Lv, J. Lu, X. Tang, Y. Hu, C. Yan, "Evaluation of the moisture resistance of rubberized asphalt using BBS/UTM bonding test, TSR and HWT test," *Construction and Building Materials*, c. 340, s. ss. 127831, 2022.
- [168] Z. Yang, L. Wang, X. Bin, D. Cao, J. Li, K. Zhao, "Performance of SBS modifier-crumb rubber composite modified asphalt used as an anti-wear layer of perpetual pavement," *International Journal of Pavement Engineering*, c. 23, s. 12, ss. 4097-4111, 2022.
- [169] D. Ren, Y. Muhammad, Y. Chen, Y. Liu, C. Mao, S. Xing, R. Pei, Z. Zhao, J. Li, "Effect of PAN fiber with bionic layered surface structure generated in situ by Fenton reaction on performance of SBS/RP asphalt binder," *Construction and Building Materials*, c. 352, s. ss. 129001, 2022.
- [170] W. Zhang, L. Zou, F. Chen, C. Yang, Y. Li, X. Yan, J. Zang, J. Liu, "Evaluation method of storage stability of SBS modified bitumen based on dynamic rheological properties," *Construction and Building Materials*, c. 323, s. ss. 126615, 2022.
- [171] F. Ma, Y. Wang, Z. Fu, Y. Tang, J. Dai, C. Li, W. Dong, "Thermal ageing mechanism of a natural rock-modified asphalt binder using Fourier Transform Infrared Spectroscopy analysis," *Construction and Building Materials*, c. 335, s. ss. 127494, 2022.